

Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

+ *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.

+ *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.

+ *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.

+ *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página `http://books.google.com`



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

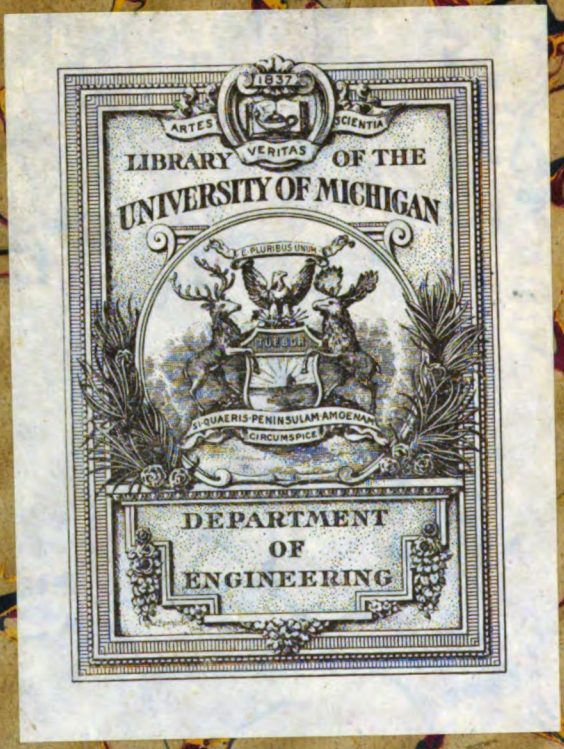
En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

49	141	134	126	118	110	102	94,5	86,5	78,5	70,6	62,8	55	47,2	39,3
21	114	108	102	95,5	89	82,6	76,4	70	63,6	57,3	50,9	44,5	38,2	31,8
95,5	90,5	85,3	80,5	75,5	70,4	65,4	60,4	55,3	50,3	45,2	40,2	35,2	30,2	25,1
73,2	69,3	65,5	61,7	57,8	54	50	46,2	42,4	38,5	34,6	30,8	27	23,1	19,2
63	59,7	56,4	53	49,7	46,4	43,1	39,8	36	33,2	29,8	26,6	23,2	19,9	16,6
53,7	50,9	48,1	45,2	42,4	39,6	36,8	34	31,1	28,3	25,4	22,6	19,8	17	14,1
45,1	42,7	40,4	38	35,6	33,2	30,9	28,5	26,1	23,8	21,4	19	16,6	14,2	11,9
37,3	35,4	33,4	31,4	29,4	27,5	25,5	23,6	21,6	19,6	17,7	15,7	13,7	11,8	9,8
30,2	28,6	27	25,4	23,8	22,2	20,7	19,1	17,5	15,9	14,3	12,7	11,1	9,6	7,9
23,9	22,6	21,4	20,1	18,8	17,6	16,3	15,1	13,8	12,6	11,3	10	8,8	7,5	6,3
18,3	17,3	16,4	15,4	14,4	13,5	12,5	11,5	10,6	9,6	8,7	7,7	6,7	5,8	4,8
13,4	12,7	12	11,3	10,6	9,9	9,2	8,5	7,8	7,07	6,4	5,7	4,9	4,3	3,5
9,3	8,8	8,3	7,8	7,4	6,9	6,4	5,9	5,4	4,9	4,4	3,9	3,4	2,9	2,5
6	5,7	5,3	5	4,7	4,4	4,1	3,8	3,5	3,2	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6
3,3	3,2	3	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1	0,8
1,5	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1	0,9	0,86	0,8	0,7	0,6	0,55	0,5	0,4

Bulletin

Association des Ingenieurs Electriciens Sortis de l'Institut Electrotechnique Montefiore, Liege

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

LIBRARY
TK
2
.A85

Digitized by Google

Digitized by Google



1896-1897

TOME VIII

(2e SÉRIE)

Bulletin

RÉDACTION

M. G. L'HOEST, quai Mativa, 22, Liége

Secrétaire Général.

ÉDITEURS

MM. GAUTHIER-VILLARS et fils

Quai des Grands-Augustins, 55

PARIS.

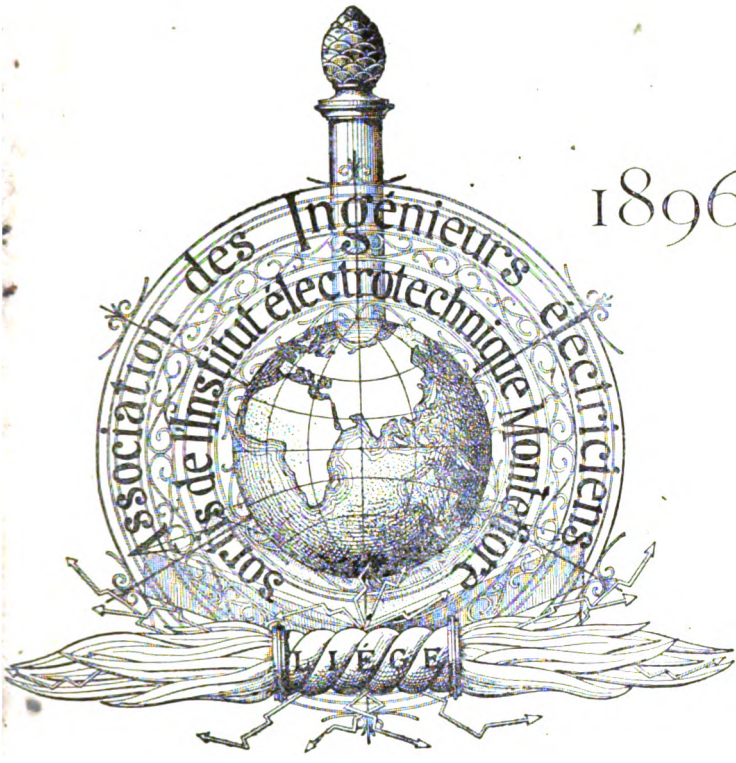
Imprimerie : LÉON DE THIER
Boulevard de la Sauvenière, 10, Liége

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin.

Abonnement annuel . . . . Fr. 20-»

Digitized by Google

Digitized by Google



1896-1897

TOME VIII

(2e SÉRIE)

Bulletin

RÉDACTION

M. G. L'HOEST, quai Mativa, 22, Liége

Secrétaire Général.

ÉDITEURS

MM. GAUTHIER-VILLARS et fils

Quai des Grands-Augustins, 55

PARIS.

Imprimerie : LEON DE THIER

Boulevard de la Sauvenière, 10, Liége

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin.

Abonnement annuel . . . . Fr. 20-»

Digitized by Google

Digitized by Google

LISTE DES MEMBRES.

PRÉSIDENT D'HONNEUR:

M. le Sénateur George MONTEFIORE, fondateur de l'Institut Montefiore, rue de la Science, 35, Bruxelles.

VICE-PRÉSIDENT D'HONNEUR:

M. Eric GERARD, directeur de l'Institut Montefiore, rue Saint-Gilles, 43, Liége.

MEMBRES HONORAIRES:

MM. AYRTON, W. E., professeur au City and Guilds of London central Institution, Exhibition Road, Londres S. W. (Grande-Bretagne);

BANNEUX, P. J., directeur d'administration des Télégraphes, Bruxelles;

CORNU, M. A., membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École polytechnique, rue de Grenelle, 9, Paris (France);

DELARGE, Frédéric, Ingénieur en chef, directeur-général des Télégraphes (Hôtel des Télégraphes), Bruxelles;

FERRARIS, Galileo, professeur au Musée royal italien de l'industrie, Turin (Italie);

† HERTZ, Henri, professeur à l'Université de Bonn (Allemagne);

HOPKINSON, J., professeur au King's College de Londres, Victoria Street, 5, Westminsters Chambers, Londres (Grande-Bretagne);

Digitized by Google

Lord KELVIN of LARGS, professeur à l'Université de Glasgow (Grande-Bretagne);

KITTLER, Erasmus, professeur à l'École technique supérieure de Darmstadt (Allemagne);

MASCART, E. E. N., membre de l'Institut, professeur au Collège de France, rue de l'Université, 176, Paris (France);

POTIER, A., ingénieur en chef des mines, professeur à l'École polytechnique et à l'École des mines, membre de l'Institut, boulevard Saint-Michel, 89, Paris (France);

ROITI, A., professeur à l'École des hautes études, Florence (Italie);

ROUSSEAU, C., professeur à l'Université, rue Vautier, 30, Bruxelles;

THOMSON, Elihu, professeur à Lynn (Mass.), États-Unis.

COMITÉ:

MM.	DE BAST, Omer,	*Président.*
	DEL PROPOSTO, Césidio,	*Vice-Président.*
	HENRARD, Georges,	*id.*
	PIERARD, Emile,	*id.*
	MELOTTE, Félix,	*id.*
	L'HOEST, Gustave,	*Secrétaire-Général.*
	LARMOYER, Georges,	*Trésorier.*
	BAYET, Maurice,	*Commissaire.*
	BRIFFAUX, Philippe,	*id.*
	CRUCIANI, Joseph,	*id.*
	FRANCKEN, Edmond,	*id.*
	GROTTENDIECK, Paul,	*id.*
	JULIUS, Charles,	*id.*
	X.....	*Secrétaire-adjoint.*
	X.....	*id.*

Digitized by Google

ANCIENS PRÉSIDENTS:

MM. ZUNINI, Luigi, (1887-1889)
LIBERT, Joseph, (1889-1890)
DE WEYDLICH, Titus, (1890-1891)
DEMANY, Léon, (1891-1892)
DE BAST, Omer, (1892-1893)
FRANCKEN, Edmond, (1893-1894)
DE BAST, Omer, (1894-1895)
MELOTTE, Félix, (1895-1896)

MEMBRES EFFECTIFS:

MM. ALFIERI, Giuseppe (électricien 1896), lieutenant d'artillerie, ingénieur à la Société anonyme Electricité et Hydraulique, Marcinelle.

ANDRINGA, Alexandre (électricien 1891), capitaine commandant adjudant major du 8e régiment d'artillerie, boulevard de la Constitution, 23, Liége.

ARENDT, Charles (mines 1883, électricien 1884), ingénieur, chaussée de Charleroi, 62, Bruxelles.

ASTFALCK, Alfred (électricien 1886), Ober-ingénieur der Elektrizitäts Actien Gesellschaft worm W. Lahmeyer et Cie (de Francfort a/M.), Friedrich-Wilhemstrasse, 4, Duisburg a/Rh. (Allemagne).

AUFORT, Albert, (1896), ingénieur civil, rue de la Tombe Issoire, 81, Paris (France).

BAERT, Adrien, (civil-électricien 1896) ingénieur à Utrecht (Hollande).

BAFFREY, Raymond (A. et M. électricien 1896), ingénieur à la Société industrielle des Téléphones, usines de Bezons, Seine-et-Oise (France).

Digitized by Google

BAILLY, Armand (méc. 1892, électricien 1896), ingénieur à la Société Cockerill, rue Colard Trouillet, 6, Seraing.

BAIVY, Edouard (électricien 1892), ingénieur des Télégraphes, rue Lesbroussart, 75, Bruxelles.

BARDINI, Philippe (électricien 1895), ingénieur à l'Union Elektrizitäts gesellschaft, rue Charles Morren, 15, Liége.

BASQUIN, Jules (électricien 1895), rue de la Fère, 209, Saint-Quentin (France).

BAYET, Maurice (électricien 1888), ingénieur à la Compagnie industrielle d'accumulateurs électriques, place Saint-Pierre, 14, Liége

BÈDE, Philippe (électricien 1890), ingénieur directeur-gérant de la Société anonyme « Force Eclairage », rue Ruysdael, 13, Bruxelles.

BERTEMATI, Carlos (mines 1884, méc. et électricien 1886), directeur des mines de Cuatro Amigos, rue Larga, 59, Jerez de la Frontera (Espagne).

BERTOLINI, Jules (électricien 1889), lieutenant de la marine royale italienne, SS. Apostoli, sul canal Grande, Venise (Italie).

BESOSTRI, Pietro (civil 1894, électricien 1895), ingénieur civil, Brera, 21, Milan (Italie).

BETOCCHI, Arthur (électricien 1896), ingénieur de la maison Fabius Henrion, Nancy (France).

BISKE, Michel (électricien 1895), ingénieur à la Société anonyme « Electricité et Hydraulique », rue du Pont-Neuf, 33, Charleroi.

BOURQUIN, Jules (électricien 1890), ingénieur, secrétaire de la Direction des usines à gaz, rue de Condé, 5, Bordeaux (France).

Digitized by Google

BOUVA, Jean (électricien 1894), ingénieur, rue de l'Est, 29, Ostende.

BRIFFAUX, Philippe, Alphonse (électricien 1896), capitaine du génie, rue Jonckeu, 34, Liége.

BROAD, Colin (électricien 1890), ingénieur, chef de section de la commissão da estrada de ferro Catalaô à Cuyaba, Caixa, 22, Santos (Brésil).

BRONNE, Georges (électricien 1893), ingénieur, rue Darchis, 40, Liége.

BRONNE, Louis (électricien 1894), ingénieur, rue Darchis, 40, Liége.

BRUNHES, Louis (électicien 1893), ingénieur, place Philippe Lebon, 14, Lille (France).

BUNNIK, Herman (officier de marine e. r., électricien 1895), Villa Aurora, Maarssen, près d'Utrecht (Hollande).

BUSSET, Paul (électricien 1894), ingénieur, Spreestrasse, 1ª, Charlottenburg (Allemagne).

CALMEAU, Léon (mines 1892, électricien 1894), ingénieur à Hollogne-aux-Pierres.

CALVÉ, Fernand (A. et M. 1892, électricien 1893), rue Boissière, 31, Paris (France).

CAMMÉO, A. (ponts et chaussées 1885), ingénieur et industriel, via Solférino, 7, Milan (Italie).

CAVALIERI, Filippo (électricien 1896) ingénieur, Trieste (Autriche).

CAVALLI D'OLIVOLA, comte Camillo (électricien 1884), via di Po, 30, Turin (Italie).

CECCACI, Pietro (électricien 1894), via Palestro, 18, Ancône (Italie).

CENTURIONE, Carlo (électricien 1886), ingénieur, via S. S. Giacomo e Filippo, 19, Gênes (Italie).

Digitized by Google

CHANTRAINE, Alphonse (mines 1889, électricien 1888), ingénieur, chef de service aux usines de Hautmont (France-Nord).

CHAUDOIR, Maurice (électricien 1890), docteur en sciences physiques et mathémathiques, directeur de l'Institut polytechnique de Liége préparatoire aux études supérieures, rue de Sclessin, 10, Liége.

CHEMIN-PALMA, Giovanni (civil 1893, électricien 1895), ingénieur, Bassano Vienza (Italie).

CHOULGUIN, Eugène (électricien 1896), rue de Huy, 42, Liége.

CIGOGNA MOZZONI, comte Charles (électricien 1893), ingénieur

CLERICI, Carlo (électricien 1894), ingénieur, via Monforte, 48, Milan (Italie).

CLOSE, Ernest (mines 1884, électricien 1885), ingénieur des Télégraphes, rue Vondel, 62, Bruxelles,

COLARD, Oscar (électricien 1892), ingénieur des Télégraphes, rue de l'Écuyer, 39, Bruxelles.

COLLIN, Emile (A. et M., électricien 1896) ingénieur, faubourg de France, 34, Belfort, Haut-Rhin (France).

CONOR, Auguste (mécanicien 1894, électricien 1895), ingénieur civil, rue de la Duchée, 83, Cherbourg (France).

COOPS-BUSGERS, Édouard (électricien 1895), ingénieur, rue des Vennes, 126, Liége.

COUARD, Léon (arts 1893, électricien 1895), avenue Ledru-Rollin, 50, Paris (France).

CROMBÉ, Georges (ingénieur civil 1893, électricien 1894), ingénieur à la Société générale de chemins de fer économiques, chaussée de Vleurgat, 16, Ixelles-Bruxelles.

CRUCIANI, Joseph (électricien 1889), ingénieur de la

Digitized by Google

Société Électricité et Hydraulique, Restesilo, 22, Naples (Italie).

CUCCURULLO, Gennaro (électricien 1895), ingénieur à la Compagnie Internationale d'Électricité, rue Saint-Pierre, 11, Liége.

DALLEMAGNE, Georges (mines 1894, électricien 1895).

DARDENNE, Henri (mécanicien 1892, électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, rue St-Josse, 3, Bruxelles.

DAWSON, Philip (P. et C. 1890, électricien 1891), Victoria Street, 39, Westminster London S. W. (Grande-Bretagne).

DE AGUIAR D'ANDRADA, Edouard (électricien 1894), ingénieur.

DE BAST, Omer (électricien 1890), répétiteur à l'Institut Montefiore, rue César Franck, 16, Liége.

DECROËS Joseph (électricien 1894), ingénieur, rue des Guillemins, 12, Liége.

DE ERCORECA, Rufino (méc. 1888, électricien 1890), ingénieur de la maison Armando Legorgen, Calle del Tiboli, Bilbao (Espagne).

DE GNOINSKI, Xavier (électricien 1895), ingénieur de la maison Siemens et Halske, Englische strasse, 31, Charlottenburg bei Berlin (Allemagne).

DE JONGE, Willem (méc. électricien 1891), ingénieur, Scheveningsche Weg, La Haye (Hollande).

DE KONING, Elisabertus (électricien 1896), Goes (Hollande).

DELEPAULLE, Hubert (électricien 1894), ingénieur à la Compagnie continentale du gaz, rue de France, 6, Bruxelles.

DEL PROPOSTO, Césidio (électricien 1895), assistant à l'Institut Montefiore, rue St-Gilles, 31, à Liége.

Digitized by Google

DEL PUGLIA, Antonio, (électricien 1896) ingénieur, via Fusari, Siena (Italie).

DELTENRE, Louis (P. et C. 1891, électricien 1895), ingénieur à la société des Railways économiques Liége-Seraing et extensions, rue Nagelmackers, 10, Liége.

DEMANY, Ernest (électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, Hôtel des Postes, Bruxelles.

DEMANY, Léon (A. et M. 1878, électricien 1885), ingénieur de the Antwerp Téléphone and Electrical Works, avenue Quantin Massys, 36, Anvers.

DEMARET, Léon (mines 1884, électricien 1885), ingénieur au corps des mines, place de Flandre, 17, Mons.

DE MEGLITZKY, Nicolas (électricien 1896), ingénieur, Roux lez-Charleroi.

DERCLAYE, Oscar (mines 1892, électricien 1893), ingénieur au corps des mines, directeur des travaux des charbonnages Oignies et Aiseau, Aiseau.

DE ROCHEMONT, Charles (électricien 1895), officier du génie, Ginneken, près Bréda (Hollande).

DE ROTE, Robert (électricien 1896), ingénieur des tramways électriques du Caire (Égypte).

DE RYCKERE, Georges (P. et C. 1890, électricien 1891), ingénieur en chef à la Compagnie internationale d'Électricité, quai de Coronmeuse, 28, Liége.

DESSAIN, Joseph (électricien 1896), rue Louvrex, 69bis, Liége.

DETHIOUX, Joseph (mines 1891, électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, rue du Nord, 42, Bruxelles.

DE WAAL, Wilhem (électricien 1896), officier de la marine hollandaise, Surinam, 43, La Haye (Hollande).

DEWANDRE, Émile (mines 1891, électricien 1893), ingénieur des mines, boulevard Audent, Charleroi.

Digitized by Google

De Weydlich, Titus (P. et C., 1885, électricien 1888), ingénieur à Holubecze, (station du chemin de fer sud-ouest de Russie : Kryjapol).

D'Hoop, Ernest, (électricien 1893), ingénieur à la Société Les Tramways Bruxellois, rue de Hollande, 48, Bruxelles.

Dierman, William (électricien 1888), ingénieur-conseil, rue de la Sablonnière, 27, Bruxelles.

Discry, Émile (mines 1889, électricien 1890), ingénieur au corps des mines, directeur gérant de la Société anonyme des charbonnages de Werister, à Fléron.

Doneddu, Louis (électricien 1892), ingénieur à la Compagnie internationale d'Électricité, Herstal.

Dubois, Alfred (électricien 1894), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue Navez, 10, Charleroi.

Duchesne, Georges (électricien 1896), quai Marcellis, 8, à Liége.

Durand, José (électricien 1894), inspecteur des installations électriques dans la marine de guerre, Esmeralda, 22, Buénos-Aires. (République Argentine).

Dutillieux, Maurice (A. et M., génie civil et mines 1879, électricien 1894), ingénieur à la Société générale de chemins de fer économiques, chaussée de Wemmel, 195, Jette-Saint-Pierre.

Du Welz, Maurice (mines 1887, électricien 1889), directeur du service technique de la Société anonyme Électricité et Hydraulique, La Villette, 315, Charleroi.

Erens, Fritz (méc. 1892, électricien 1894), ingénieur de la maison Siemens et Halske, Bahnabtheilung, Markgrafenstrasse, 94, Berlin (Allemagne)

Digitized by Google

EVERARTS, Alphonse, (mines, électricien 1896), ingénieur, Blanmont, Chastre Villeroux

FALKENBERG, Andréas (mécanicien 1893, électricien 1895), ingénieur à l'Union Elektrizitäts Gesellschaft, Zweigbureau, Wilhemstrasse, 39, Berlin (Allemagne).

FARMAN, Dick, (électricien 1891), ingénieur, rue Lafayette, 53, Paris (France).

FERRAND, Alphonse (électricien 1894), ingénieur attaché au service du matériel et de la traction à la Compagnie P. L. M., rue Lacuée, 14, Paris (France).

FIRKET, Victor (mines 1891, électricien 1893), ingénieur au corps des mines, rue Fusch, 44, Liége.

FONTAINE, Henry (électricien 1896), ingénieur, Goeffer-dingen, lez-Grammont.

FRANCKEN, Edmond (mines 1878, électricien 1891), ingénieur aux chemins de fer de l'État, quai de Fragnée, 19, Liége.

FRENAY, Henri (mines 1883, électricien 1884), ingénieur, directeur de la Fabrique nationale d'armes de guerre, rue Laport, 3, Liége.

GARNIER, Victor (électricien 1886), ingénieur, Pinerolo (Italie).

GÉRARD, Émile (mines 1883, électricien 1884), constructeur d'appareils de physique et de précision, quai d'Amercœur, 21, Liége.

GERLERI, César (électricien 1884), ingénieur à Pinerolo per Osasco, province de Turin (Italie).

GILLON, Paul (électricien 1893), ingénieur des mines, avenue Rogier, 27, Liége.

GIUSTETTI, Umberto (électricien 1896), officier du génie à la direction du génie italien, Pignerole, Turin (Italie).

Digitized by Google

GOETZEN, Boleslas (électricien 1894), ingénieur

GRITTERS, Hendrik (électricien 1891), ingénieur de la Maison Groeneveld, van der Poll & C°, bureau électrotechnique d'Amsterdam, Vijzelstraat, 57, Amsterdam (Hollande).

GROSSMANN, Léon (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, boulevard Piercot, 1, Liége.

GROTTENDIECK, Paul (électricien 1890, mécanicien 1891), ingénieur à la Société Électricité et Hydraulique, rue du Ravin, 43, Charleroi.

HALKADER, Ladislas (électricien 1895),

HENRARD, Georges (électricien 1889), ingénieur en chef du service d'exploitation à la Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (France).

HENRION, Albert (électricien 1896), lieutenant d'artillerie, rue de Joie, 32, Liége.

HERDT, Louis (électricien 1894), assistant à l'Université Mc Gill, avenue Laval, 58, Montréal (Canada).

HERTZ, Willem (électricien 1896), ingénieur, rue du Centre, 42, Verviers.

HOROWITZ, Samuel, (électricien 1896), ingénieur der Allgemeine Electricitäts Gesellschaft, Gerhard Strasse, 12 II, Berlin N. W. (Allemagne).

HUILLET, Antoine (électricien 1896), ingénieur au service électrique des usines du Creusot, rue St-Éloi, 5, Le Creusot, Saône et Loire (France).

ILKOFF, Urdan (électricien 1896), ingénieur électricien des Télégraphes et Téléphones de Bulgarie, Sophia (Bulgarie).

JACQUES, Julien (électricien 1896), sous-lieutenant d'artillerie, rue Naimette, 6, Liége.

Digitized by Google

JANSSEN, Alfred (mines 1889, électricien 1890), ingénieur à la Société anonyme liégeoise d'Électricité, rue Lambert-le-Bègue, 36, Liége.

JAVAL, Jean (électricien 1894), ingénieur, rue de Grenelle, 52, Paris (France).

JONA, Emmanuel (électricien 1885), ingénieur à la manufacture de câbles Pirelli, Milan (Italie).

JULIUS, Charles-Henri (électricien 1894), ingénieur, Rijnsburgerweg, 417^{H}, Leiden (Hollande).

KEIFFENHEIM, Hugo (électricien 1891), Fernwood road, Newcastle on Tyne (Angleterre).

KOENIGSBERG, Isidore (électricien 1895), ingénieur, rue Cans, 13, Bruxelles.

LAMBERT, Alphonse (électricien 1893), ingénieur honoraire des ponts et chaussées, ingénieur des constructions navales, ingénieur des Télégraphes, avenue des Fleurs, 170, Uccle, lez-Bruxelles.

LARMOYER, Georges (électricien 1888), directeur de la Société anonyme pour la construction d'appareils de sécurité pour voies ferrées, quai de Fragnée, 22, Liége.

LECHAT, Carl (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, à la Société Les Tramways Bruxellois, avenue Louise 325, Bruxelles.

LECHAT, Paul (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, avenue d'Avroy, 57, Liége.

LEMAIRE, Léon (mines 1887, électricien 1888), ingénieur à la maison Ghislain, rue des Armuriers, 11, Liége.

L'HOEST, Gustave (mines 1874, électricien 1888), ingénieur principal aux Chemins de fer de l'État, quai Mativa, 22, Liége.

LIBERT, Joseph (mines 1874, électricien 1884), ingé-

Digitized by Google

nieur principal au corps des Mines, rue Saint-Léonard, 414, Liége.

LINDER, Léo (électricien 1896), ingénieur, Queens gate, 27, Londres, S. W. (Grande Bretagne).

LOEWENSTEIN, Alfred (mines 1891, électricien 1893), ingénieur, rue de Courcelles, 45, Paris (France).

LUDERGNANI, Ferrucio (électricien 1889), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue du Parc, 11, Charleroi.

MAGENTIES, Louis (électricien 1894), ingénieur, rue de l'Arbre Sec, 13, Lyon (France).

MALASPINA, marquis Torquato (civil 1894, électricien 1895), via Macini, 10, Turin (Italie).

MANZI, Julio (électricien 1892), ingénieur, Civita Vecchia (Italie).

MARKOVITCH, Grégoire (mécanicien, électricien 1896), ingénieur à la Société l'Oxhydrique, rue de la Banque, 18, Bruxelles.

MARKOVITCH, Stefan, docteur en sciences physiques de Vienne, professeur à la Faculté technique, Markova uliza, 5, Belgrade (Serbie).

MARTIN, Gaston (électricien 1896), ingénieur, rue Deville, 3, Toulouse, Haute-Garonne (France).

MASSANGE, Maurice, (mines, électricien 1896), ingénieur,

MASSON, Émile (mines 1884, électricien 1885), ingénieur honoraire au corps des mines, directeur du matériel des charbonnages de Marihaye, Flémalle-Grande.

MATHIEU, Émile (électricien 1896), sous-lieutenant à la Compagnie d'ouvriers du génie belge, Anvers.

MAVROÏDIS, Georges (électricien 1896), ingénieur aux ateliers Jaspar, rue de la Régence, 47, Liége.

Digitized by Google

MÉLOTTE, Félix (mines 1887, électricien 1888), ingénieur, directeur technique des ateliers Jaspar, rue du Parc, 43, Liége.

MICHAUX, Camille (électricien 1894), ingénieur directeur du bureau technique de la société Tudor (accumulateurs électriques), rue de l'Hotel de Ville, 58, Lyon (France).

MIHAÏL, Stefan (électricien 1895),

MINCULESCU, Constantin, (électricien 1895),

MINSIER, Camille (mines 1873, électricien 1885), ingénieur en chef, directeur des mines, rue Baslé, 20, Charleroi.

NAGELMACKERS, Gaston (A & M. 1891, électricien 1892), ingénieur à la Société des Forges et Tôleries liégeoises, rue de Liége, 83, Jupille.

NAGTGLAS-VERSTEEG, Cornelis, Dirk (électricien 1891), ingénieur, directeur technique de l'agence électro-technique de la Société anonyme Electricité et Hydraulique de Charleroi, Heerengracht, 115, Amsterdam (Hollande).

NAVARRO-VIOLA, Jorge (électricien 1893), ingénieur à la ville de Buenos-Aires, Maipù, 40 (République Argentine).

NICODÈME, Paul (mécanicien 1889, électricien 1895), ingénieur de la maison de Dietrich et Cie, villa Mon Rève, Niederbronn (Alsace).

NIEUWLAND, Pierre (électricien 1894), ingénieur, attaché au Ministère de l'Industrie et du Travail, rue Franklin, 49, Bruxelles.

NOBILI, Dino (électricien 1894), ingénieur, piazza S. M., Novella, 25, Florence (Italie).

NOÉ, Francesco (électricien 1892), ingénieur mécanicien, Casa Dassi, Pavie (Italie).

Digitized by Google

NOIRFALISE, Léon (A. et M. 1891, électricien 1892), ingénieur, secrétaire de la Société générale d'entreprise de travaux, directeur du chemin de fer vicinal d'Ans-Oreye, quai de la Boverie, 6, Liége.

NORSTRAND. Albert (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur à la Berliner maschinenbau Aktien Gesellschaft vorm Schwartzkopff Electrotech. Abteilung Berlin N. (Allemagne).

NOTHOMB, Gérard (électricien 1896), ingénieur, avenue Louise, 48, Bruxelles.

NOWINSKI, Joseph, ingénieur à l'usine électrique (ingénieur I. Margulis), rue Langeron, Odessa (Russie).

ORBAN, Charles (mécanicien 1889, électricien 1890), ingénieur, directeur de l'usine du secteur des Champs-Elysés, boulevard Victor Hugo, 98, Neuilly s/Seine, lez-Paris, (France).

PEDRIALI, Giuseppe (électricien 1892), ingénieur à la Société anonyme Les Tramways bruxellois, place Bara, 8, Bruxelles.

PEETERS, François (électricien 1896), ingénieur, Retinne.

PEREGRINI, Jean (civil 1894, électricien 1895), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, quai du Brabant, 17, Charleroi.

PERUSSET, Gustave (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur, villa Laurence, 1, Lausanne (Suisse).

PESCETTO, Frédéric (électricien 1887), major du génie militaire, professeur à l'Ecole d'application d'artillerie et du génie, Turin (Italie).

PHILIPPE, Georges (électricien 1894), attaché à l'exploitation de la Compagnie du chemin de fer du Nord, rue la Limite, 1, Liége.

Digitized by Google

PICARD, Georges (électricien 1889), directeur technique de la Société anonyme des papeteries (ancienne maison Olin et fils), Virginal.

PICAZO, Léopold (électricien 1890), ingénieur rue San Raphaël, 66, San Fernando (Espagne).

PIEDBOEUF, Louis (électricien 1896), Bismarckstrasse, 17, Dusseldorf (Allemagne).

PIERARD, Emile (mines 1886, électricien 1887), ingénieur des Télégraphes, rue des Rentiers, 92, Etterbeek-Bruxelles.

PIERRON, Paul (chimiste-électricien 1896), ingénieur, rue Duvivier, 12, Liége.

PIO, Césare (électricien 1896), officier au 7e régiment Bersaglieri, Aquila (Italie).

PLANAS Y ESCUBOS, Juan (électricien 1894), ingénieur à la Société Planas, Floquer y Cie, Ronda de la Universitad, 22, Barcelone (Espagne).

POENARU, Dimitri (électricien 1894), ingénieur chef de section au ministère des travaux publics, Strada Clapotarii, 10, Bucharest (Roumanie).

POLYSU, Constantin (électricien 1894), ingénieur à l'atelier central des chemins de fer roumains, Strada Calonfirescu, 9, Bucharest (Roumanie).

QUINAUX, Ernest, major d'artillerie, boulevard de la Sauvenière, 66, Liége.

RANSY, Auguste (mines 1879, électricien 1884), ingénieur, cour des Minimes, 11, Liége.

RAZU, Aristide, (officier du génie, électricien 1895), Strada Sculpturei, 29, Bucharest (Roumanie).

RECULEZ, Maurice (électricien 1896), ingénieur à Liége.

RENARD, Lucien (électricien 1895), ingénieur à la maison Fabius Henrion, rue des Maréchaux, 35, Nancy (France).

Digitized by Google

RENSONNET, Alfred (électricien 1896), ingénieur à la Compagnie Helios, Cologne Ehrenfeld (Allemagne).

REVEL, Francisco (électricien 1894), capitaine d'artillerie, Fabbricca d'armi de guerra, Turin (Italie).

RHONE, Jean (électricien 1896), ingénieur, rue du Pré-aux Clers, 10, Paris (France).

RIBONI, Pietro (électricien 1896), ingénieur au corps des mines italien, via Vittoria, 53, Milan (Italie).

RIZZO, Guguelmo (électricien 1896), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue de Marcinelle, Charleroi.

ROBERT, Léon (méc. 1894, électricien 1895), rue Vinâve-d'Ile, 13, Liége.

ROBERT, Paul (électricien 1896), ingénieur aux Chemins de fer de l'État, rue de Livourne, 43, Bruxelles.

ROOSEN, Alfred (mines 1885, électricien 1886), ingénieur des Télégraphes, rue Vondel, 64, Bruxelles.

ROSENFELD, Léon (électricien 1896), ingénieur, Krestchatik, 10, Kiew (Russie).

ROUSSEAU, Auguste (électricien 1895), officier du génie, rue des Prébendiers, 20, Liége.

RUEMPOL, Everhard (électricien 1893), capitaine du génie, Ziebenstraat, 60, Nimègue (Hollande).

RUTTEN, Arthur (électricien 1892), ingénieur

SANTARELLI, Giorgio (P. et C. 1887, électricien 1888), constructeur d'appareils de précision, via Giotto, 2bis, Florence (Italie).

SAROLÉA, Jean (P. et C. 1888, électricien 1894), ingénieur à la Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (France).

Digitized by Google

SARRAT, Frédéric (électricien 1896), ingénieur, soldat au 18e Escadron du Train des Équipages Militaires, 5e Compagnie, Bordeaux, La Bastide (France).

SCANDIANI, Angelo (civil 1894, électricien 1895), ingénieur à la Société générale Italiana Edison di Elettricita, via Tommasso Grossi, 2, Milan (Italie)

SCARAMANGA, Pantalémon (méc. 1890, électricien 1891), ingénieur à Bakhmout, gouvernement d'Ekatérinoslaw (Russie).

SCHEFFER, Jean (électricien 1894) ingénieur-mécanicien, Diergaardelaan, 25, Rotterdam (Hollande).

SCHIFFERS, Henri (méc. 1894, électricien 1895), rue de Bruxelles, 67, Verviers.

SCHOEFFER, Louis (électricien 1896), ingénieur, place de Meir, 54, Anvers.

SCHREIBMANN, Frédéric (électricien 1895), ingénieur

SÉE, Armand (électricien 1892), ingénieur de la maison E. et P. Sée (constructions industrielles, éclairage, chauffage, ventilation, humectation, etc.), rue Nicolas Leblanc, 51, Lille (France).

SEGRE, Vito (électricien 1886), ingénieur, rue Massena, 3, Turin (Italie).

SEMENZA, Guido (électricien 1894), ingénieur à la Societa Generale Italiana Edison di Elettricita, via Fatebenefratelli, 21, Milan (Italie).

SERRA DE CASSANO, Louis (électricien 1893), ingénieur à la Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston, rue de Londres, 27, Paris (France).

SLAWINSKI, Alexandre (chimiste 1894, électricien 1895), ingénieur à la Société Anonyme des Usines métallurgiques Glebow ; Krestnaia, terre des Cosaques du Don (Russie).

Digitized by Google

SOMACH, Henri, Haine (électricien 1896), ingénieur, rue Jonckeu, 22, Liége.

STEELS, Oscar (P. & C. 1893, électricien 1894), ingénieur des Télégraphes, Destelbergen-lez-Gand.

TASTÉ, Albert (mines 1889, électricien 1892), ingénieur à Verviers.

TURCHI, Carlo (P. & C. — électricien 1896), ingénieur, via Giovecca, 89, Ferrara (Italie).

VAN AARDENNE, Jean (électricien 1894), ingénieur, Ringseistrasse, 14, München (Allemagne).

VAN DER GOOT, Fiepko (électricien 1891), ingénieur, N. Z. A. S. M. Transvaal, Prétoria.

VAN DER WALLEN DE FERNIG, Guillaume (P. & C. 1894, électricien 1896), ingénieur à la Société Cockerill, à Seraing.

VAN KESTEREN, Charles (mines 1894, électricien 1895), ingénieur à l'Union Elektrizitäts Gesellschaft, rue Hydraulique, 7, Bruxelles.

VAN PREHN, Wilhem (électricien 1892), ingénieur, Herderinnestraat, 9A, La Haye (Hollande).

VAN VLOTEN, Paul (mines 1884, électricien 1885), ingénieur, avenue Louise, 391, Bruxelles.

VENEZIAN, Émile (industriel 1886, électricien 1895), ingénieur au ministère de l'industrie et du commerce, via Stanperia, Rome (Italie).

VERDELEANU, Léon (électricien 1893), ingénieur à l'Usine électrique de l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft de Berlin, strada Unireï, 128, Craïova (Roumanie).

VER EECKE, Abel (électricien 1894), lieutenant du génie, compagnie des télégraphistes de place et artificiers, Anvers.

Digitized by Google

VITALE, Maurice (électricien 1894), ingénieur civil, Biella (Italie).

VODOPIANOFF, Jean (mécanicien 1890, électricien 1895), Duflon et Constantinovitch, Marosscika, maison Léonoff, Moscou (Russie).

VOÏNAROWSKI, Paul (électricien 1895), ingénieur des Télégraphes, professeur à l'Institut électrotechnique de Saint-Pétersbourg (Russie).

VON BOSCHAN, Arthur (P. & C., 1881), ingénieur au « Kaiser Ferdinand Nordbahn » Burgring, 1, Vienne (Autriche).

Von HAHN, Karel (électricien 1893), ingénieur, I, Jeinfaltstrasse, 7, Vienne (Autriche).

WERY, Émile (mines 1893, électricien 1894), ingénieur aux charbonnages d'Abhooz et Bonne-Foi-Hareng, Herstal.

WIGNY, Paul (électricien 1896), ingénieur, rue de la Halle, 23, Liége.

WINSLOW, George-Herbert (électricien 1888), consulting-électrical Engineer, Lewis Building, 6 th, avenue et Smithfieldst. Pittsburg, Penna, U. S. A.

WOYCIECHOWSKI, Justinien (électricien 1895), ingénieur à la Compagnie Schuckeert et Cie, Nuremberg (Allemagne).

ZELENAY, Constantin (électricien 1895), ingénieur à la Société pour l'exploitation de l'énergie électrique, Perspective de Newski, 74, Saint-Petersbourg (Russie).

ZUNINI, Luigi (électricien 1884), professeur à l'Institut technique supérieur, piazza Duomo, 25, Milan (Italie).

MEMBRES ASSOCIÉS :

MM. BOULVIN, Roch (mines 1881), ingénieur des Télégraphes, rue de la Croix de Fer, 35, Bruxelles.

Digitized by Google

CABELLA, Bartolomeo, directeur de la Tecnomasio. Milan (Italie).

CLEMENCIN (lieutenant d'artillerie), ingénieur à la Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (France).

CLOEREN, Henri, chef du service des essais aux usines de bronze phosphoreux de M. G. Montefiore-Levi, rue de Douvres, 15, Anderlecht-Bruxelles.

DEBACHY, Charles, répétiteur à l'École provinciale des mines du Hainaut, Mons.

DE CAZENAVE, ingénieur, administrateur-délégué de the Antwerp Telephone and Electrical Works, boulevard Léopold, 13. Anvers.

DULAIT, Julien (mines 1878), administrateur-gérant de la Société Électricité et Hydraulique, rue Prunieau, 1, Charleroi.

HANAPPE, Saturnin, professeur à l'École provinciale des mines du Hainaut, La Hestre.

HEN, Léon (ex-officier du génie), fabricant de câbles électriques, rue de la Concorde, 33, Bruxelles.

LEBRUN, B., Ateliers de construction de Nimy-Mons.

MACQUET, Auguste (mines 1876), ingénieur au Corps des mines, directeur de l'École des mines, boulevard Dolez, 22, Mons.

MALENGRET, Achille, ingénieur, rue du Gouvernement, 1, Mons.

MANNE, Jacques (mines 1871), directeur de la Fabrique de bronze phosphoreux, rue du Bronze, 8, Anderlecht-Bruxelles.

PASQUALINI, Louis, professeur, ingénieur électricien, via Colombo, 5, Spezia (Italie).

PIEPER, Henri (fils), administrateur délégué de la Com-

Digitized by Google

pagnie internationale d'Électricité, rue des Bayards, Liége.

PROCTOR FARADAY, C., ingénieur électricien, chargé de la fabrication des instruments et montures électriques à la Edison Swan United Electric Light C° L^d, 2, Bedford Villes, Southbury road, Enfield-Middlessex (Angleterre).

VAN DEN KERCKHOVE, Armand, ingénieur, rue de la Loi, Bruxelles.

WEILER, Max, ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, Charleroi.

WEINMAN, industriel, rue Stephenson, 10, Bruxelles.

MEMBRES TEMPORAIRES.

MM. AGUADO, Cayetano, rue Bertholet, 2, Liége.

ANDRÉ, Henri (A. & M.), ingénieur, rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

ANTONIOTTI, Richard, lieutenant d'artillerie italienne, rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

ASBJÖRNSEN, M. Görlitz (civ. 1892), ingénieur, rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

BERLOW, Michel (méc.), rue Charles-Morren, 36, Liége.

BERTHOLET, Armand, candidat-ingénieur, rue Gérardrie, 24, Liége.

CALLET, George (civ.), ingénieur, rue du Diamant, 5, Liége.

CASSA, Gerrit, Jacobus, capitaine du génie de l'armée des Indes néerlandaises, rue St-Adalbert, 5, Liége.

CHEFTEL, Joseph, ingénieur constructeur, rue de la Paix, 38, Liége.

COMPYN, capitaine du génie, rue de la Liberté, 39, Liége.

Digitized by Google

DEBAVELAERE, Julien-Alfred (civ.), ingénieur, rue Jonckeu, 20, Liége.

DE LUBORADZKI, Severin (méc.), ingénieur, place des Béguinages, 7, Liége.

DE SAUTEIRON DE St-CLÉMENT, Charles, capitaine d'artillerie de l'armée italienne, rue Dartois, 3, Liége.

DOPPLER, Henri, lieutenant d'artillerie de l'armée néerlandaise, rue du Jardin Botanique, 5, Liége.

DUEZ, Jules (méc.), ingénieur, rue Monulphe, 1, Liége.

EXELBIRTH, Grégoire, élève-électricien, rue des Célestines, 17, Liége.

FAÜEL, Marinus, officier du génie de l'armée des Indes néerlandaises, Murssen-Limbourg.

FAVART, Ernest, ingénieur constructeur, rue des Augustins, 51, Liége.

FERON, Albert, élève-électricien, rue des Vennes, 32, Liége.

FONTAINE, Félix, candidat-ingénieur, rue de la Madeleine, 2, Liége.

GERARD, Amédée (méc. 1896), ingénieur, rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

GOLDSCHMIDT, Henri-Paul (A. & M.), ingénieur, rue Pot-d'or, 51, Liége.

HYDE, Edgard (indust.), ingénieur, place de la Cathédrale, 22, Liége.

JULLIEN, Georges, rue de la Cathédrale, 61, Liége.

JOVIGNOT, ingénieur E. C. P., rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

KUIPHORST, Gerrit-Jean, lieutenant de la marine néerlandaise, rue des Clarisses, 20, Liége.

LIBIER, Alfred, chez M. Picard, Jemeppe s/Meuse.

Digitized by Google

MAUS, Benjamin (const. civ.), ingénieur, rue Fond-St-Servais, 12, Liége.

MOOJEN, L.-J., rue des Anglais, 3, Liége.

MORIONDI, Charles, avenue d'Avroy, 71, Liége.

PELTZER, Alfred (méc.), ingénieur, place St-Paul, 1, Liége.

PIRARD, Léon, candidat-ingénieur, Souverain-Wandre, lez-Liége.

PRAPORTCHETOWITCH, L., officier d'artillerie serbe, rue Saint-Gilles, 31, Liége.

RENWART, Paul, élève-électricien, à Esneux.

SOMERHAUSEN, Henri (civ.), ingénieur, hôtel des Thermes, Cointe.

VAN ASPEREN, Corneille, ancien officier de la marine royale néerlandaise, rue de Chestret, 23, Liége.

VAN DER HECHT, Léon-Henri, ingénieur civil, rue André Dumont, 17, Liége.

VAN MUSSCHENBROECK, Pieter, lieutenant de la marine royale néerlandaise, rue de Chestret, 23, Liége.

VAN RIJN, Cornelis, officier de la marine royale néerlandaise e. r., boulevard de la Sauvenière, 148, Liége.

VEKER, Ladislas (méc.), ingénieur, rue St-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

VISCIDI, Pasquale (civil 1896), ingénieur, rue des Mineurs, 14, Liége.

WALCH, rue de la Cathédrale, 61, Liége.

Digitized by Google

SÉANCE DU 29 NOVEMBRE 1896.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence: MM. André, Asbjörnsen, Bayet, Berlow, Briffaux, Caldorera, Cassa, Cheftel, Choulguin, De Bast, Debavelaere, Decroës, Del Proposto, de Luboradzki, de Meglitzky, de Ryckère, de Sauteiron, Doppler, Francken, Gerard, A., Gerard, Em., Henrion, Jovignot, Jullien, Larmoyer, L'Hoest, Massange, Maus, Mavroïdis, Mélotte, Moojen, Moriondi, Nicolini, Peltzer, Praportchetovitch, Robert, L., Rosenfeld, Somerhausen, Sveginski, Van Asperen, van der Wallen, van Musschenbroeck, Veker, Viscidi, Walch.

Les procès-verbaux de séance publiés dans les fascicules nos 9 et précédents sont approuvés.

M. De Bast, *président*, notifie à l'assemblée que MM. Eric Gerard et Grottendieck, empêchés d'assister à la séance, se sont fait excuser. M. L'Hoest ne pouvant arriver au début de la séance, M. Briffaux donne lecture, en son nom, du rapport annuel du secrétaire général, dont le texte est reproduit ci-après :

Messieurs et Chers Camarades,

J'ai l'honneur de vous exposer la situation de notre Société à l'expiration de l'année sociale 1895-1896 et de vous remémorer les travaux produits pendant cette période.

Il m'est bien agréable de constater, tout d'abord, l'accroissement toujours plus important du nombre de nos sociétaires. Avant la session d'examens, qui a fait passer

Digitized by Google

49 membres temporaires dans la catégorie des membres effectifs, nous comptions 15 membres honoraires, 188 membres effectifs, 19 membres associés et 51 membres temporaires, soit au total 273 sociétaires. Le chiffre des membres effectifs s'étant accru de 49, nous estimons que nous compterons plus de trois cents membres lorsque les adhésions des élèves nous seront complètement parvenues.

Le seul fait d'administration, dont je dois faire ici mention est la décision que le Comité a prise de clôturer la liste des membres associés; c'est là moins une résolution de principe qu'une mesure provisoire, réservant absolument la décision de l'Assemblée générale à laquelle une revision des statuts sera proposée.

Pour cette revision, qui devra être aussi définitive que possible, le Comité saura mettre à profit l'expérience acquise en dix années d'existence; il veut aussi règlementer certaines extensions des moyens de l'Association, dont il poursuit la réalisation en ce moment.

Pendant l'année écoulée, l'Association a été heureuse de participer à des manifestations en l'honneur de deux de ses membres honoraires, l'une tout intime à l'égard de son Vice-Président d'honneur, l'autre entourée d'une solennité exceptionnelle, à l'égard de l'illustre lord Kelvin.

* * *

C'est par une étude sur l'induit des machines à courant continu que notre Président a inauguré les travaux de l'année. Entreprise par un auteur aussi bien en possession de ce sujet que l'est M Mélotte, cette étude présente un intérêt tout particulier; nous ne saurions mieux en faire l'éloge que de rappeler le vœu, exprimé par M. De Bast, de voir l'auteur compléter ce travail par l'étude de l'inducteur.

Digitized by Google

M. le professeur Eric Gerard et notre camarade M. Henrard, sous le titre trop modeste de *Notes sur les courants polyphasés*, nous ont présenté le fruit de l'enquête approfondie qu'ils ont faite en Allemagne et en Suisse sur les applications de ce genre de courants. On sait que les points les plus discutés de la question sont la fréquence, le nombre de phases et le type des alternateurs; c'est sur ces points surtout que les auteurs ont multiplié leurs informations, sans négliger, toutefois, les autres parties de la question, telles que les types de moteurs, les expédients utilisés pour leur démarrage, les transformateurs et les réseaux. Comme complément de leur étude, les auteurs nous ont donné la description de la vaste installation des gares de Dresde et l'intéressante distribution de Chemnitz.

C'est un sujet de controverse qui n'est pas épuisé que la cause du mélange des courants téléphoniques dans les lignes aériennes. M. Piérard nous a apporté sa contribution à l'étude de la question, en réfutant l'opinion d'auteurs qui se refusent à accorder à ce phénomène une origine électro-statique.

Nous devons à M. De Bast une bien intéressante monographie de l'appareillage des tramways électriques, dans laquelle la pratique actuelle des installations nous est présentée avec la clarté et la méthode habituelles de l'auteur. La forme didactique de cette communication, qui prend la question *ab ovo*, a obligé l'auteur à toucher successivement tous les détails de l'installation d'un tramway, en accordant à chacun l'importance qui lui revient.

Les phénomènes de Röntgen ont alimenté d'une manière extraordinaire la presse électrique pendant l'année écoulée. Dans une conférence qu'il nous a faite sur ces curieuses expériences, M. le professeur Gerard nous a exposé tout d'abord les patientes recherches par lesquelles Crookes, Hertz et Lénard ont préludé à la découverte du

Digitized by Google

professeur de Wurtzbourg. Comme l'a dit M. Gerard, le grand public ne connait que le nom de Röntgen; c'est un hommage bien légitimement rendu à ses précurseurs que de dire comme ils ont préparé la voie à l'inventeur des rayons X.

MM. Cruciani, Del Proposto et Mavroïdis nous ont spécialement entretenus de questions de traction électrique.

Les inconvénients du retour par les rails, tel qu'il est généralement usité, ont préoccupé M. Cruciani, qui nous a montré les ressources que peut offrir dans ce cas l'usage d'une dynamo auxiliaire, abaissant le voltage des rails en des points choisis.

M. Del Proposto est l'auteur d'une méthode bien complète pour le calcul des réseaux de tramways, dont la détermination des éléments semble avoir été faite assez empiriquement jusqu'aujourd'hui. Il s'est attaché surtout à montrer la possibilité et l'utilité d'emploi de la règle de lord Kelvin, nonobstant l'avis de M. Burch que cette loi, appliquée à un réseau de tramways, doit conduire à un résultat erroné.

M. Mavroïdis nous a tenus au courant des récentes modifications apportées à l'appareil capteur du courant dans les tramways à fil aérien.

Les lignes téléphoniques, en raison de leur charge et des portées énormes qu'elles comportent, nécessitent souvent des supports particulièrement robuste, et bien étudiés. L'emploi des supports métalliques se généralise chaque jour davantage et c'est à leur calcul que M. Piérard consacre une note substantielle, complétée d'ailleurs par des renseignements pratiques dont maints d'entre nous feront leur profit.

Une Société puissante a doté la ville de Lyon d'une distribution d'énergie électrique de 20,000 chevaux, en

Digitized by Google

utilisant la force motrice du Rhône, en amont de la ville. Notre camarade, M. Henrard, était mieux que personne en situation de nous renseigner sur cette importante entreprise. Vous avez tous lu, sans doute, le Mémoire si documenté qu'il a publié dans notre *Bulletin* sur les grandes lignes du projet, la canalisation et la transformation des courants à 3,500 volts. L'auteur nous réserve la continuation de son travail, qui traitera des moteurs et de l'usine génératrice.

Nous citerons encore de M. Piérard une note sur l'attache Manne pour les fils téléphoniques à longue portée ; du même, quelques réflexions sur la transformation des moyens de la Société hydro-électrique d'Anvers ; de M. Mélotte, un procédé de calcul de la section des feeders branchés sur un tronc commun. Enfin, j'ai eu l'honneur de vous soumettre un procédé de détermination des résistances partielles des rhéostats de démarrage pour moteur à courant continu.

Quelques discussions ayant un objet technique ont accru l'intérêt de nos séances. Nous mentionnerons spécialement celle qu'a soulevée la publication du règlement belge sur l'emploi de l'électricité dans les mines. Cette discussion a eu pour résultat immédiat de bien préciser la portée de ce règlement qui n'a pas le caractère d'intransigeance que d'aucuns avaient cru.

Il me reste à signaler une importante étude dont notre camarade M. Van Vloten a été chargé par l'Union des Tramways, et qui porte sur les perturbations et les influences nuisibles dues à la traction électrique. Nous avons enrichi la Chronique de notre *Bulletin* de nombreux extraits de ce rapport.

Digitized by Google

* * *

Cette année encore, le *Bulletin* a été alimenté exclusivement par des travaux de nos sociétaires : on ne pourrait mieux constater la vitalité de l'Association.

M. Larmoyer, *trésorier*, expose ensuite la situation financière et rend compte de sa gestion pendant l'année écoulée.

Le bilan ci-après est approuvé.

RECETTES.		DÉPENSES.	
a). En caisse le 24 novembre 1895 :		*a*). *Bulletin*, impressions,	
Livret de la caisse	fr. 3 114,74	planches, etc. .	fr. 1 910,01
Réserve pour débours	» 100,00	Ports	» 193,85
b). Cotisations arriérées perçues . .	» 230,00	Droits d'auteur.	» 568,25
c). Cotisations de 1895-1896 perçues.	» 3 740,00	*b*). *Séances*, gratification de service .	» 50,00
d). Cotisations anticipatives 1896-97.	» 42,50	Convocations et ports. . . .	» 34,38
e). Abonnements au *Bulletin*	» 88,00	*c*). *Secrétariat*, indemnité d'employé. .	» 300,00
f). Vente du *Bulletin*	» 143,50	Papeterie et affranchissements.	» 202,80
g). Tirés à part supplémentaires . .	» 46,90	*d*). *Trésorerie*, frais de correspondance et de recouvrements	» 323,23
h). Dons et Recettes diverses	» 245,10	*Balance*. En caisse le 22 novembre 1896 :	» 4 314,03
i). Intérêts des fonds déposés	» 145,81		
Total.	fr. 7 896,55	Total.	fr. 7 896,55

M. De Bast, *président* de l'Association pour l'année sociale 1896-1897, inaugure les travaux de l'année par l'allocution suivante :

Digitized by Google

Messieurs et chers Camarades,

En me déférant, pour la troisième fois, l'honneur de présider, pendant une année, les travaux de l'*Association des ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore*, vous m'avez donné une marque nouvelle de votre estime et de votre sympathie, qui me réjouit à un double titre: d'abord, parce qu'elle me permet de croire que j'ai su remplir à votre satisfaction les premiers mandats qui m'ont été confiés, et, ensuite, parce que j'y perçois l'assurance que, dans le champ de franche et cordiale camaraderie qui englobe tous les membres de l'Association, je me trouve à un potentiel élevé.

Vous exprimer ma sincère reconnaissance est un désir que j'ai hâte de satisfaire. Vous savez, Messieurs et chers Camarades, que tout mon dévouement est acquis à l'Association. J'espère que mes efforts parviendront à justifier, cette fois encore, votre confiance.

Pendant l'exercice écoulé, la prospérité de notre jeune Société a continué à grandir et son renom scientifique à s'affermir. Je remplis un devoir très agréable en adressant des remercîments aux camarades qui, pendant cette période, ont participé aux travaux des séances, collaboré à la rédaction du *Bulletin* et pris soin des intérêts matériels de la Société.

Vous m'en voudriez, Messieurs, si je ne témoignais ici, d'une manière toute spéciale, la gratitude de l'Association à M. Félix Mélotte, qui s'est acquitté des fonctions de

Digitized by Google

président avec un zèle et un tact justement remarqués, et à M. Gustave L'Hoest, notre dévoué secrétaire-général, que je voudrais pouvoir appeler secrétaire perpétuel, tant sont précieux les services qu'il ne cesse de rendre dans l'accomplissement de sa tâche importante, délicate et ingrate.

* * *

Il est de tradition, dans notre Association, que le président commence, chaque année, la série des travaux du nouvel exercice. Pour me conformer à cet usage, je me propose de vous exposer aujourd'hui le commencement d'une étude sur le calcul des générateurs électriques à courants alternatifs, entreprise, à la demande de plusieurs camarades, au point de vue de l'ingénieur chargé du projet d'une machine de l'espèce.

Étant données les hypothèses qu'on est forcément obligé d'introduire dans les raisonnements afin de rendre l'examen mathématique du fonctionnement des alternateurs abordable et d'arriver à des formules relativement simples pour la détermination des éléments de construction de ces appareils, les méthodes de calcul de ces derniers ne peuvent avoir la prétention de conduire à des résultats exacts et l'on ne peut leur demander qu'une première approximation.

J'ai tâché de tenir compte rationnellement, dans la mesure du possible, des influences complexes en jeu dans les machines dont il s'agit, et je serais reconnaissant aux membres de l'Association, qui auraient l'occasion d'appliquer la méthode que je propose, de bien vouloir me communiquer les résultats qu'elle leur a donnés et les observations qu'elle leur a suggérées.

Digitized by Google

***

Éléments du calcul des générateurs électriques à courants alternatifs.

ALTERNATEURS MONOPHASÉS.

Dans ce qui suit, je passerai d'abord brièvement en revue les dispositions typiques auxquelles on peut ramener les nombreuses variétés d'alternateurs industriels, sans toutefois m'attarder à l'examen de leurs mérites et de leurs inconvénients respectifs. J'établirai et discuterai ensuite les relations, propres aux alternateurs, qui unissent les éléments de fonctionnement de ces machines aux données de construction. Je montrerai enfin comment on peut conduire les calculs d'un avant-projet de générateur de ce genre.

FORMES TYPIQUES D'ALTERNATEURS.

Principes des divers arrangements. — Comme dans toute machine destinée à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique par le jeu des phénomènes d'induction électromagnétique, on distingue dans l'alternateur deux parties dont le nom caractérise le rôle, l'*inducteur* et l'*induit* ou *armature*, et dont le déplacement relatif est assuré par le mouvement de rotation uniforme de l'une ou l'autre autour de leur axe de figure commun.

Les conducteurs que porte l'armature traversent successivement les flux de force magnétique amenés à celle-ci par les pôles du système inducteur.

Digitized by Google

Si l'on considère isolément un conducteur de l'induit, coupant les lignes de force, on voit que les flux magnétiques inducteurs voisins doivent être alternativement de sens contraires pour que le conducteur devienne le siège d'une force électromotrice alternative. On reconnait aisément que la période de cette dernière correspond alors au passage du conducteur par la même position dans deux flux consécutifs de même sens ; si donc p désigne le nombre de flux inducteurs traversés pendant une révolution de la machine, et N le nombre de tours que celle-ci effectue par seconde, la fréquence est égale à $\frac{1}{2} p$ N.

Pour ajouter les effets des divers conducteurs actifs de l'induit, on connecte ceux-ci entr'eux en série de manière que les forces électromotrices de sens opposés, développées dans les conducteurs qui passent au même instant à

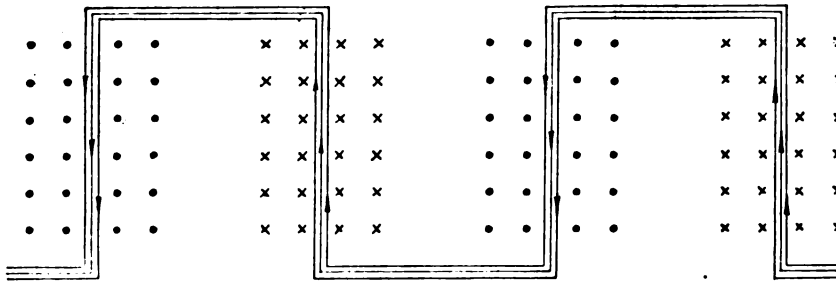


Fig. 1.

travers des flux contraires, concourent. Ce résultat est atteint par les enroulements que représentent schématiquement les fig. 1 et 2, dans lesquelles les lignes de force des flux magnétiques sont figurées par des points ou de petites croix suivant qu'elles sont dirigées vers le lecteur ou en sens inverse.

Le premier dispositif réalise une sorte de zigzag qui

Digitized by Google

peut faire plusieurs fois le tour de l'armature, tandis que le second système comporte une série de bobines juxtaposées.

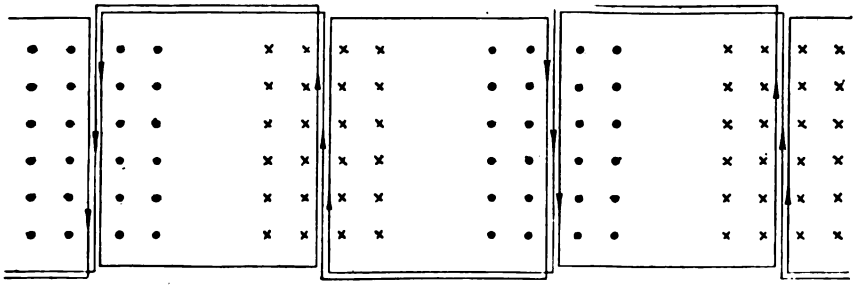


Fig. 2.

Si les flux magnétiques inducteurs traversant l'armature étaient tous de même sens, il se développerait dans chaque conducteur induit une force électromotrice pulsatoire variant entre zéro et un maximum. Dans ces

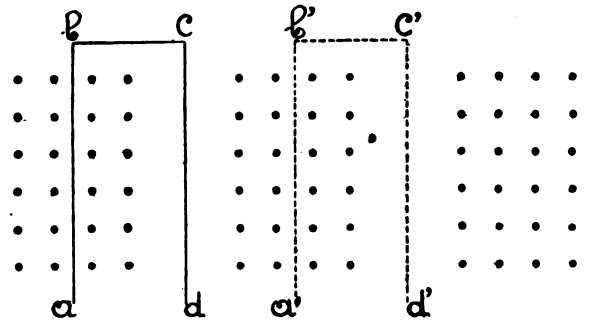


Fig. 3.

conditions, il est cependant possible d'obtenir une force électromotrice résultante alternative, si l'on associe convenablement les conducteurs par paires dont l'un des éléments se trouve dans l'intervalle qui sépare

Digitized by Google

deux flux voisins, tandis que l'autre coupe les lignes de force d'un flux. Comme il est aisé de s'en convaincre en étudiant le déplacement du système *abcd* dans la fig. 3, les deux conducteurs d'une telle paire deviennent actifs

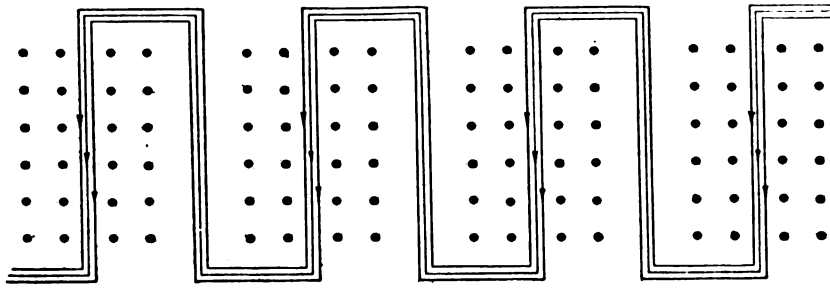


Fig. 4.

successivement et leur ensemble fournit une force électromotrice alternative dont la période dure autant que leur passage d'une position *abcd* à la position semblable immédiatement voisine $a'b'c'd'$. La fréquence de la force élec-

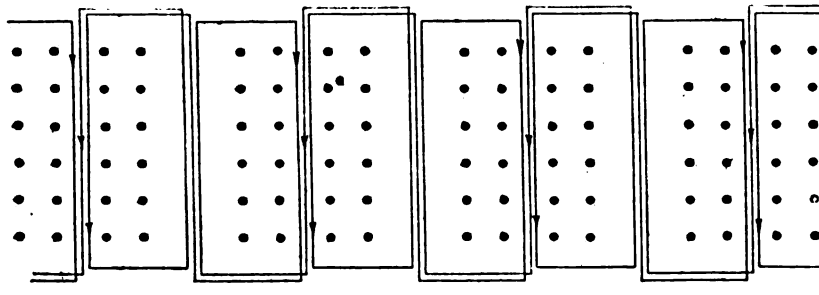


Fig. 5.

tromotrice des machines de ce genre est donnée par la formule pN, si, comme plus haut, le nombre de flux inducteurs est p et la vitesse angulaire N tours par seconde.

Digitized by Google

Les paires de conducteurs, telles que *abcd*, qui garnissent l'induit, peuvent également être reliées entr'elles de manière à constituer un enroulement en zigzag ou à bobines juxtaposées. Les fig. 4 et 5 indiquent schématiquement ces dispositions.

Il est évident qu'on peut fractionner tous les enroulements dont il vient d'être question en un certain nombre de parties identiques pour grouper celles-ci en dérivation par les extrémités semblables.

Quand l'induit est mobile, son enroulement est relié électriquement aux conducteurs extérieurs par l'intermédiaire de balais attachés à ces derniers et frottant sur des bagues métalliques entraînées dans le mouvement de l'armature et auxquelles aboutissent les extrémités du circuit induit. Le courant d'excitation est amené par un dispositif analogue aux inducteurs tournants.

Agencement des inducteurs et des induits. — Il est possible de réaliser matériellement de manières très diverses les combinaisons précédentes. Néanmoins, les nombreuses formes d'alternateurs qu'on rencontre dans l'industrie dérivent d'un petit nombre de types.

Si on laisse de côté les machines magnéto-électriques, les inducteurs se réduisent toujours à une carcasse en métal magnétique, fonte, fer ou acier, présentant des projections saillantes en face de l'armature et soumise à l'action magnétisante d'une ou de plusieurs bobines parcourues par un courant électrique continu.

Le système est ainsi agencé qu'il se forme à travers la masse métallique un ensemble de flux magnétiques dont les lignes de force, fermées sur elles-mêmes à travers l'armature, sont amenées à celle-ci par les projections saillantes qui constituent une série de pôles alternativement N et S ou tous de même nom, suivant le cas.

Digitized by Google

Nous décrirons quelques systèmes typiques d'inducteurs en traitant des induits auxquels ils conviennent plus spécialement.

Les induits des alternateurs peuvent être classés en trois catégories principales, constituées par les *induits à anneau*, les *induits à tambour* et les *induits à disque.*

Induits à anneau. — Les induits à anneau comportent un noyau en fer doux convenablement divisé, affectant la forme d'un tore de révolution, sur lequel les conducteurs,

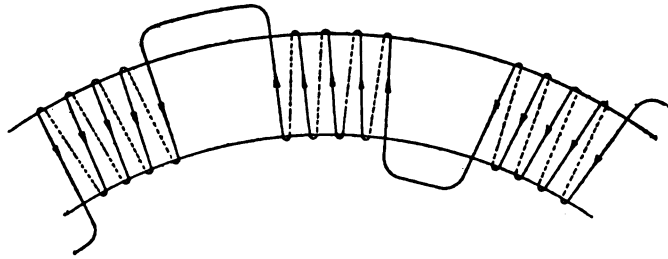


Fig. 6.

enroulés suivant des plans méridiens, comme les fils d'un anneau Gramme de machine à courant continu, sont groupés en sections équidistantes. Les sections consécutives sont enroulées en sens inverses et réunies en série par les extrémités voisines (fig. 6), sinon, connectées entr'elles par les extrémités semblables (fig. 7).

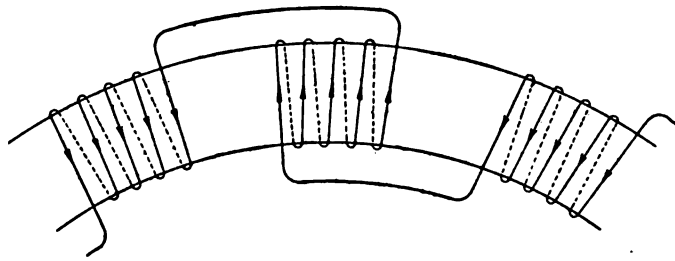


Fig. 7.

Digitized by Google

Vis à vis de la face intérieure (alternateur Gramme, à induit fixe et inducteur mobile, fig. 8), de la face extérieure (fig. 9) ou des faces latérales du tore (alternateur Kapp, à induit mobile, fig. 10), le système inducteur pré-

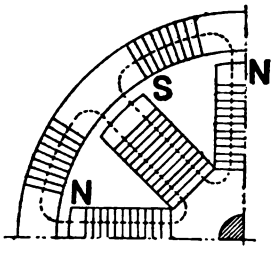


Fig. 8.

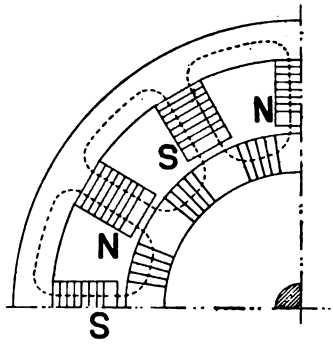


Fig. 9.

sente autant de projections polaires qu'il y a de sections induites. Ces projections sont fixées à une culasse commune et portent les bobines magnétisantes dans lesquelles le courant inducteur circule suivant des sens tels que les

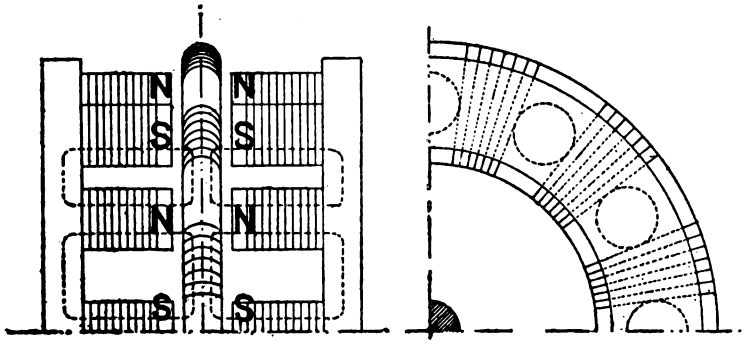


Fig. 10.

polarités des projections voisines soient contraires. Quelquefois des noyaux bobinés alternent avec des projections

Digitized by Google

dépourvues d'enroulements, et le courant d'excitation parcourt alors toutes les bobines dans le même sens. Il va sans dire qu'on pourrait utiliser un système inducteur dans lequel les enroulements magnétisants seraient bobinés entre les projections saillantes, sur la couronne supportant celles-ci, qui constitueraient alors des pôles conséquents, ou, encore, recourir à un dispositif analogue à celui que

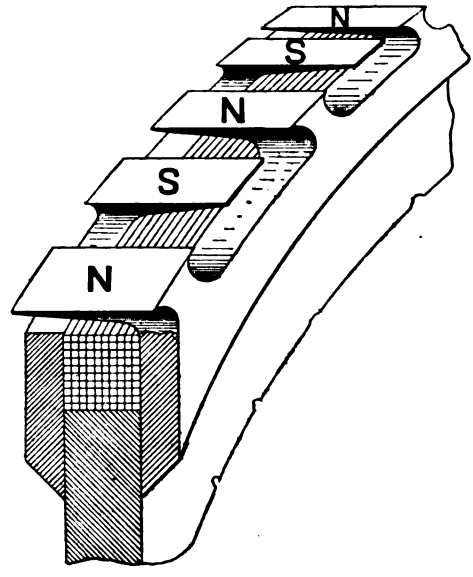


Fig. 11.

M. Brown a appliqué à des alternateurs munis d'induits à tambour, en vue de réduire l'enroulement magnétisant à une bobine unique. Celle-ci est glissée sur une sorte de poulie contre les faces planes de laquelle sont boulonnées deux couronnes pourvues d'épanouissements recourbés. Les épanouissements de l'une des couronnes sont engagées dans les intervalles qui séparent ceux de la seconde, de

Digitized by Google

sorte que l'ensemble réalise également une juxtaposition de pôles alternativement N et S.

Dans tous les cas, comme l'indiquent les lignes pointillées des fig. 8, 9 et 10, les lignes de force magnétique, s'échappant d'un pôle N du système inducteur dans l'entrefer, se bifurquent à travers le noyau de l'armature vers les pôles S voisins. Ainsi, quand l'inducteur ou l'armature tourne, les sections induites sont traversées par des flux de force croissant et décroissant progressivement dans les deux sens, comme dans l'exemple de la fig. 2.

Induits à tambour. — Ces armatures possèdent un noyau semblable à celui des induits précédents; mais dont l'enroulement ne garnit qu'une seulement des faces cylindriques, en regard de laquelle le système inducteur présente une couronne concentrique de projections polaires. Les conducteurs actifs de l'enroulement induit sont appliqués contre cette face suivant des génératrices et connectés entr'eux par des liaisons établies sur les faces planes terminales du noyau.

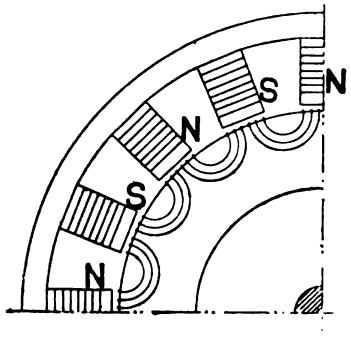


Fig. 12

Quand les pôles inducteurs sont alternativement de noms contraires, l'arrangement des conducteurs induits réalise l'une des combinaisons figurées par les schémas 1

Digitized by Google

et 2, et les formes que peut affecter l'inducteur sont semblables à celles décrites à propos des alternateurs pourvus d'induits à anneau. Comme dans ces machines, les flux de force magnétique entretenus par l'inducteur s'étendent dans des circuits fermés, entre les pôles voisins, par les segments du noyau de l'induit compris entre ceux-ci. La fig. 12 montre la disposition adoptée dans l'alternateur Westinghouse dont l'armature tourne à l'intérieur du système inducteur. La disposition inverse d'un induit fixe entourant l'inducteur mobile (fig. 13) est très répandue; c'est pour un modèle d'alternateur de cette espèce que M. Brown a imaginé l'inducteur, à bobine magnétisante unique, dont il a été question plus haut.

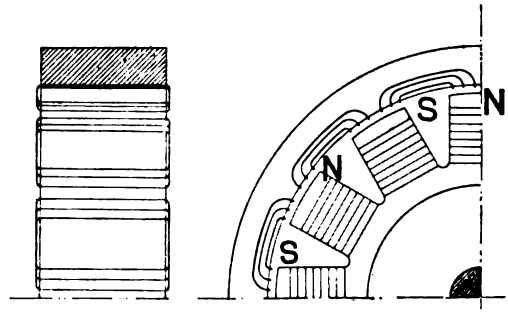


Fig. 13.

L'emploi d'un système inducteur dont tous les épanouissements polaires présentent la même polarité, combiné avec l'application aux induits à tambour d'un des systèmes d'enroulement indiqués schématiquement dans les fig. 4 et 5, permet de réaliser très simplement des alternateurs dont l'armature et la majeure partie du système inducteur, y compris l'enroulement magnétisant, qui se réduit à une bobine unique, sont fixes, la seule partie mobile consistant en une couronne en métal magnétique pourvue de projections saillantes.

Digitized by Google

La fig. 14 représente un alternateur de ce genre combiné par M. Thury. Le noyau feuilleté de l'armature est soutenu par un anneau massif en acier dont la section transversale rappelle la forme de la lettre C. L'enroulement induit est appliqué sur la face cylindrique libre du noyau, et la bobine magnétisante occupe le fond de l'évidement de

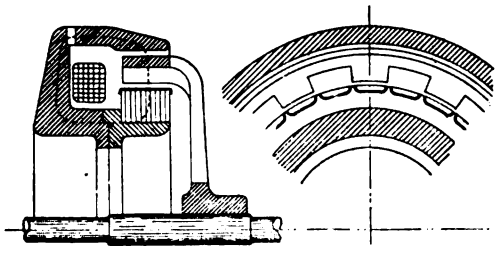


Fig. 14.

l'anneau inducteur. Cet ensemble est fixe. Autour du noyau de l'armature tourne une cloche en acier, portée par l'arbre de la machine. Elle est munie intérieurement de dents saillantes et présente, au contraire, une paroi lisse en regard de la flange extérieure de l'anneau inducteur, qui l'entoure étroitement.

Lorsque l'alternateur est excité, le système est le siège d'un flux de force magnétique dont les lignes s'étendent, autour de l'enroulement inducteur, suivant des trajectoires fermées de même sens, du genre de celle figurée en pointillé sur le croquis. Au voisinage des conducteurs induits, la denture de la cloche tournante groupe les lignes de force inductrices en faisceaux qui suivent le mouvement de celle-ci.

Plusieurs firmes construisent des alternateurs à induit double, qui ne diffèrent pas en principe du précédent. Le fer tournant est pourvu d'une denture devant chacune des armatures, dont les noyaux sont adaptés à la carcasse fixe d'un inducteur commun.

Digitized by Google

Les lignes principales d'une telle machine à axe vertical, étudiée par MM. Arnold et Kolben pour les Ateliers de construction d'Oerlikon, sont esquissées dans la fig. 15.

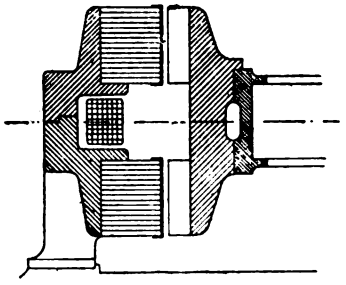


Fig. 15.

Au lieu d'offrir, en regard des pôles inducteurs, une surface lisse sur laquelle est appliqué l'enroulement induit, le noyau des armatures à anneau et à tambour peut être creusé de rainures ouvertes dans lesquelles sont logés les conducteurs électriques. Ceux-ci peuvent aussi être introduits dans des canaux pratiqués à travers la masse de fer près de la surface. Les noyaux dentés et perforés sont très usités dans les induits à tambour.

Induits à disque. — L'enroulement des induits à disque est disposé suivant une couronne circulaire plane, normale à l'axe autour duquel tourne l'organe mobile de l'alternateur.

Dans son ensemble, il affecte la forme d'un anneau aplati transversalement. Devant chacune de ses faces latérales, l'inducteur présente un cercle de pièces polaires. Les pôles des deux séries se trouvent en regard et ceux qui se correspondent de part et d'autre sont toujours de noms contraires, de sorte que le flux magnétique qui les rejoint traverse l'armature parallèlement à son axe. Dans ces

Digitized by Google

conditions, les conducteurs actifs de l'enroulement induit doivent être placés radialement et reliés par des connexions périphériques.

Ou bien, du même côté de l'induit, les pôles inducteurs sont alternativement N et S, ou bien, ils ont tous la même polarité.

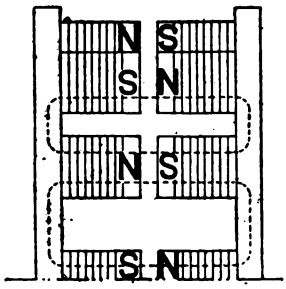


Fig. 16.

Dans le premier cas, la carcasse du système inducteur se compose le plus souvent d'une paire de flasques, auxquelles sont fixés des noyaux portant les bobines excitatrices et terminés par des épanouissements polaires de forme appropriée (fig. 16).

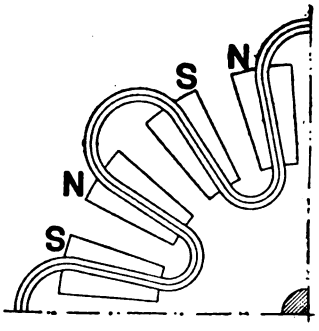


Fig. 17.

Digitized by Google

Le flux magnétique inducteur circule suivant des circuits fermés, comprenant deux noyaux voisins d'une même flasque et ceux de l'autre flasque qui leur correspondent, et traversant deux fois l'induit. M. de Ferranti employait autrefois avec un inducteur de l'espèce une armature à disque mobile, bobinée suivant le principe de la fig. 1. Le conducteur électrique était un ruban en cuivre enroulé plusieurs fois sur lui-même, suivant un profil étoilé, avec interposition d'une lanière isolante (fig. 17). Mais le mode d'enroulement de la fig. 2 est le plus usité : l'induit comporte alors une couronne de bobines plates distinctes, juxtaposées en nombre égal à celui des couples de pôles inducteurs. Telle est l'armature des alternateurs à inducteur fixe de la Maison Siemens et Halske (fig. 18).

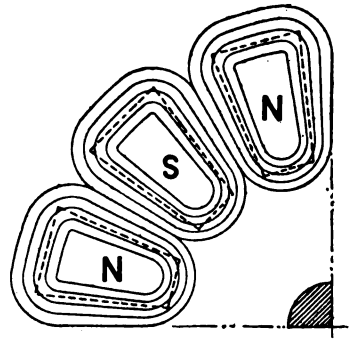


Fig. 18.

L'alternateur Mordey est un exemple de machine, avec armature à disque, dont tous les pôles inducteurs présentent la même polarité d'un même côté de l'induit. La bobine excitatrice unique est chaussée sur un noyau en fer porté par l'arbre et aux extrémités duquel sont adaptés des épanouissements polaires en fonte dont les dents courbes se rejoignent à faible distance tout autour de la

Digitized by Google

bobine (fig. 19). Les lignes de force du flux magnétique engendré par cette dernière passent d'un épanouissement polaire à l'autre à travers les intervalles d'air étroits qui séparent les faces terminales des dents en regard et dans lesquels plonge l'enroulement de l'induit stationnaire.

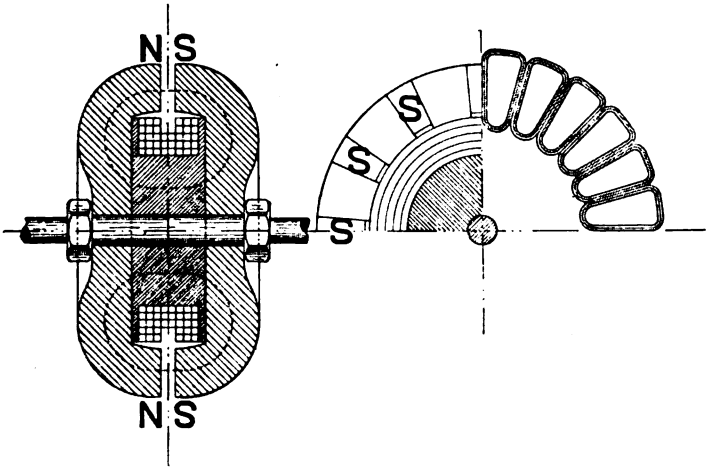


Fig. 19.

Cet enroulement, établi conformément au schéma de la fig. 5, comporte un nombre de bobines double du nombre des dents que possède chacun des épanouissements polaires de l'inducteur.

Les induits à disque sont le plus souvent dépourvus de fer.

État des masses magnétiques du noyau des induits et de la carcasse des inducteurs. — Pourvu que les bobines induites ne présentent pas de noyaux en fer quand l'armature est à disque et que, si le noyau des induits à anneau et à tambour est denté ou perforé, la largeur circonférentielle des rainures qui séparent les dents et des canaux

Digitized by Google

intérieurs soit petite, comparée à celle des épanouissements polaires de l'inducteur, la reluctance des circuits magnétiques de tous les types d'alternateurs dont il a été question jusqu'à présent est invariable pendant la rotation de l'organe mobile, lorsque l'armature ne fournit pas de courant. En charge, malgré les altérations de la perméabilité causées par la réaction magnétique de l'induit, dont le sens varie périodiquement, et l'influence des pulsations que provoque, dans l'intensité du courant d'excitation, l'induction électromagnétique du courant alternatif débité sur l'enroulement inducteur, on peut admettre la constance des flux magnétiques inducteurs dans toutes les positions du système tournant. Dans les conditions normales, la dissipation d'énergie par hystérésis dans la carcasse de l'inducteur de ces machines est minime et celle-ci peut être massive sans qu'il s'y développe de courants de Foucault d'une manière prohibitive; tout au plus peut-il être nécessaire, quand l'induit est denté, de munir les projections polaires de bouts feuilletés. Seul, le noyau en fer de l'armature, dans lequel les lignes de force magnétique se déplacent, doit être constitué par des tôles minces.

Il n'en est pas de même lorsque la reluctance des circuits magnétiques dans lesquels s'étendent les flux inducteurs subit des variations périodiques notables. La carcasse du système inducteur doit alors également être feuilletée. C'est le cas dans toutes les machines dont le noyau magnétique de l'induit présente de grandes discontinuités en regard des pôles inducteurs.

Tels sont les alternateurs avec armatures à disque comportant des bobines enroulées sur des noyaux en fer : la résistance magnétique est minima lorsque ces noyaux passent dans l'axe des pôles inducteurs opposés et elle

Digitized by Google

peut être considérablement plus grande quand ils se trouvent à côté de ces derniers.

Telles sont aussi les machines du genre de l'alternateur Ganz bien connu : leur induit peut être considéré comme un tambour denté ne possédant qu'un nombre de dents égal à celui des pôles, alternativement de noms contraires, de l'inducteur (fig. 20).

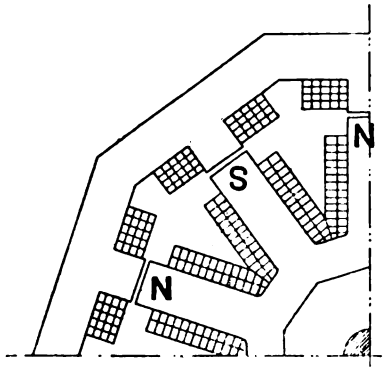


Fig. 20.

Dans la suite, il ne sera question que des alternateurs auxquels s'applique raisonnablement l'hypothèse d'une reluctance invariable des circuits magnétiques traversés par les flux inducteurs, lorsque le voltage demeure constant aux bornes de l'enroulement magnétisant; ce sont les plus répandus et les seuls dont le calcul soit relativement aisé.

RELATIONS PROPRES AU CALCUL DES ALTERNATEURS.

Remarque. — Dans ce chapitre, toutes les grandeurs seront exprimées en unités C. G. S.

Définitions. — Théoriquement, l'armature d'un alternateur se réduit, dans son ensemble, à un circuit conduc-

Digitized by Google

teur traversé par un nombre variable de lignes de force magnétique. Si l'on considère la machine à un moment donné pendant son fonctionnement, le flux magnétique $\mathfrak{N}_0$ que l'enroulement induit embrasse est, en réalité, la somme algébrique d'une fraction plus ou moins grande $\mathfrak{N}_1$ du *flux inducteur* créé par le courant d'excitation qui parcourt les bobines magnétisantes et du flux $\mathfrak{N}_2$ dû au courant de circulation même de l'induit. Ce dernier flux constitue ce qu'on appelle la *réaction magnétique de l'induit* de l'alternateur.

La *force électromotrice effective*, engendrée par les variations du flux total, est égale, à chaque instant, à la différence de potentiel utile V aux bornes du circuit induit augmentée du produit de la résistance réelle R de l'armature par le courant I que celle-ci débite :

$$-\frac{d}{dt}\mathfrak{N}_0 = V + I\,R. \qquad (a)$$

Si l'on envisage séparément les variations des deux parties constituantes du flux total, on est amené à distinguer deux forces électromotrices partielles dont les valeurs instantanées, ajoutées avec leurs signes, reproduisent la force électromotrice effective :

$$-\frac{d}{dt}\mathfrak{N}_1 - \frac{d}{dt}\mathfrak{N}_2 = -\frac{d}{dt}\mathfrak{N}_0.$$

La première, $E = -\frac{d}{dt}\mathfrak{N}_1$, correspond au flux créé par l'inducteur; nous lui réserverons plus spécialement le nom de *force électromotrice induite*. L'autre, se rapportant au flux que provoque le courant induit, est la *force électromotrice de self-induction* de l'armature :

$$-\frac{d}{dt}\mathfrak{N}_2 = -\frac{d}{dt}(\mathfrak{L}I).$$

Digitized by Google

On a

$$E = V + I R + \frac{d}{dt}(\mathfrak{L} I). \qquad (b)$$

Les équations (*a*) et (*b*) sont équivalentes et suggèrent deux procédés pour le calcul de l'excitation dont il faut pourvoir un alternateur en vue de développer une différence de potentiel utile donnée.

Le premier procédé consisterait à rechercher d'abord l'excitation capable d'induire dans l'armature une force électromotrice égale à la force électromotrice effective et à modifier ensuite la force magnétomotrice trouvée de manière à compenser la réaction magnétique de l'induit.

Dans la seconde méthode, que nous adopterons, on détermine directement le flux inducteur nécessaire pour l'obtention d'une force électromotrice induite dont la valeur est donnée à chaque instant par la somme du second membre de l'équation (*b*) La force magnétomotrice requise sur l'inducteur est celle qui correspond à ce flux.

Expression de la force électromotrice induite efficace. — Les seules parties de l'enroulement induit, qui concourent à la production de la force électromotrice induite développée par un alternateur, sont les conducteurs coupant les lignes de force des flux magnétiques que l'inducteur entretient à travers l'armature. Les divers modes d'enroulement des induits étudiés précédemment groupent ces conducteurs actifs autour de l'armature en un certain nombre de faisceaux équidistants. Quand les pôles consécutifs semblablement placés du système inducteur sont alternativement de noms contraires de manière que les conducteurs actifs coupent successivement des flux magnétiques orientés en sens opposés, les faisceaux

Digitized by Google

induits sont en nombre égal à celui des flux inducteurs rencontrés en une révolution (Voir les fig. 1, 2, 8, 9, 10, 12, 13, 17 et 18). Ils sont en nombre double, lorsque ceux-ci traversent tous l'armature suivant le même sens (Voir les fig. 4, 5, 14, 15 et 19).

Nous appellerons *alternateurs à pôles de noms contraires* les machines de la première catégorie, et *alternateurs à pôles de même nom* celles de la seconde.

D'ailleurs, quel que soit le genre de machine, nous entendrons par alternateur *p-polaire* celui dont chaque faisceau de conducteurs actifs de l'induit coupe, par révolution, p flux de force magnétique, alternativement de sens contraires ou de même sens, quoique, avec les armatures à disque, l'inducteur comporte alors deux séries opposées de p projections polaires.

Les variations périodiques de la force électromotrice induite dans un des conducteurs actifs, considéré isolément, sont régies par le mode de distribution, le long de l'armature, des lignes de force magnétique amenées par les pôles inducteurs. La forme de la courbe $e = f(t)$ qui les représente dépend de la distance des pôles voisins, de leur largeur et de leur configuration. En réalité, elle est aussi affectée par les altérations périodiques du flux magnétique inducteur que provoquent les pulsations de l'intensité du courant d'excitation dues à l'induction exercée par le courant induit sur l'enroulement inducteur. Mais il est licite, en général, de négliger cette influence et d'admettre que le flux est constant pourvu que le voltage appliqué au circuit d'excitation reste invariable.

Les surfaces polaires regardant l'induit sont ordinairement de forme rectangulaire ou trapézoïdale. La densité du flux magnétique inducteur est sensiblement uniforme sous les pôles. Autour de ceux-ci elle décroît rapidement lorsque l'induit possède un noyau magnétique et que

Digitized by Google

l'entrefer est étroit. Dans les machines avec armature à disque dépourvue de fer, dont les pôles inducteurs opposés sont parfois assez distants, l'extension latérale du flux traversant l'induit peut être beaucoup plus considérable.

Soient $\mathfrak{N}$ le flux de force magnétique amené à l'armature par chacun des pôles de l'inducteur supposé p-polaire, et N le nombre de tours qu'effectue par seconde l'organe mobile de l'alternateur.

La valeur moyenne de la force électromotrice développée dans le conducteur induit considéré est donnée, d'après la règle de Faraday, par le rapport du flux $\mathfrak{N}$ au temps $\frac{1}{p\,N}$ que dure le passage du conducteur devant un pôle :

$$e_{moy} = p\ N\ \mathfrak{N}.$$

La force électromotrice efficace correspondante peut s'obtenir en multipliant l'expression précédente par un coefficient variable avec la nature de la fonction $e = f(t)$.

$$e_{eff} = \sqrt{(e^2)_{moy}} = k\ p\ N\ \mathfrak{N}.$$

On sait que, lorsque la force électromotrice instantanée varie comme les ordonnées d'une sinusoïde simple,

$$k_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11\ ;$$

mais c'est là une condition rarement réalisée dans les alternateurs industriels.

Si n est le nombre total de conducteurs actifs sur l'armature, supposés reliés tous en série, la force électromotrice efficace de l'ensemble n'est pas égale à $n\ k_1\ p\ N\ \mathfrak{N}$, pas plus que la force électromotrice moyenne n'est égale à $n\ p\ N\ \mathfrak{N}$, comme l'on pourrait être tenté de le croire.

Digitized by Google

En effet, les conducteurs juxtaposés dans les divers faisceaux actifs équidistants que comporte l'enroulement induit, n'occupent pas simultanément la même position relative par rapport aux pôles inducteurs, de sorte que les forces électromotrices dont ils sont le siége ne sont pas en concordance de phase et que la résultante moyenne ou efficace de celles-ci n'est pas égale à la somme des composantes moyennes ou efficaces. Ainsi, dans un alternateur à pôles de noms contraires, lorsque la largeur moyenne des pôles et des intervalles qui les séparent est la même, et que, comme c'est fréquemment le cas, la largeur des faisceaux induits est également peu différente de celle des pôles, le décalage entre les forces électromotrices induites dans les deux conducteurs extrêmes d'un faisceau est voisin d'un quart de période.

S'il s'agit de machines à pôles de même nom, les forces électromotrices ne sont pas non plus en concordance de phase dans les conducteurs semblablement placés de deux faisceaux voisins, puisque ceux-ci sont alors en nombre double de celui des pôles. Les formules $n\,p\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N}$ et $n\,k_1\,p\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N}$ représentent tout au plus la force électromotrice moyenne et la force électromotrice efficace totales, dans le cas d'un alternateur à pôles de noms contraires dont les conducteurs de chaque faisceau induit sont superposés dans une même rainure étroite du noyau de l'armature.

D'une manière générale, il convient de poser pour la force électromotrice induite efficace totale développée par un alternateur

$$\mathrm{E}_{\mathrm{eff}} = k_2\,k_1\,p\,n\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N},$$

k_2 étant un facteur de réduction destiné à tenir compte des décalages relatifs des forces électromotrices composantes.

Digitized by Google

Par la réunion des deux coefficients k_2 et k_1 en un seul, l'expression de E_{eff} prend la forme sous laquelle on la rencontre dans la plupart des auteurs :

$$E_{eff} = k\,p\,n\,N\,\mathfrak{N}. \qquad (1)$$

L'origine du coefficient global $k = k_2\,k_1$ montre que sa valeur ne dépend que de l'arrangement des conducteurs actifs sur l'armature, de la nature, de la forme et de l'emplacement des pôles inducteurs autour de cette dernière.

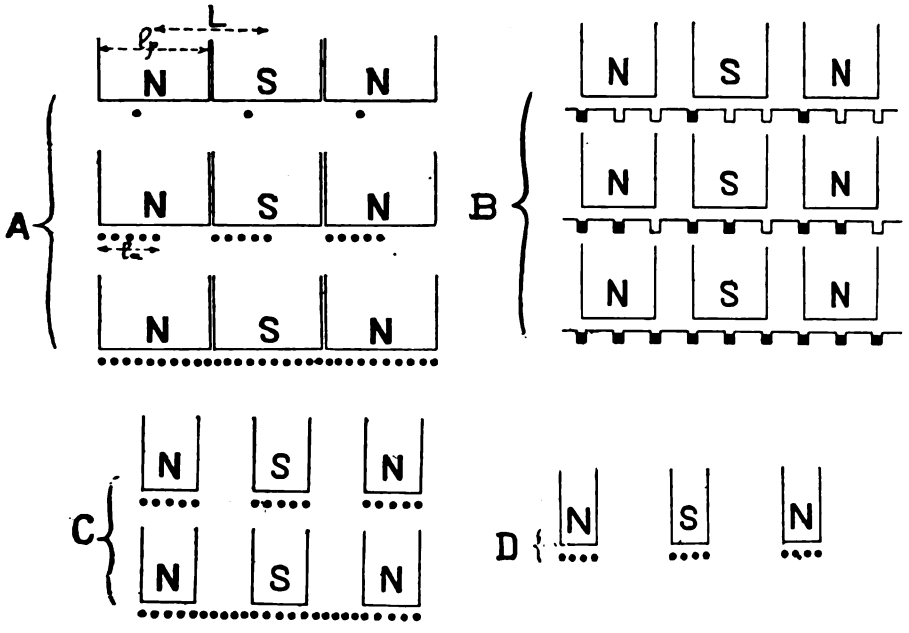


Fig. 21.

MM. Kapp et Görges en ont calculé la valeur pour les machines à pôles de noms contraires, dans quelques cas simples. Admettant que les faces polaires regardant

Digitized by Google

l'induit sont rectangulaires et que le flux magnétique, de densité uniforme sous les pôles, est limité au contour de ceux-ci, ils ont trouvé les nombres consignés dans le tableau ci-après, où L désigne la distance des milieux de deux pôles voisins de polarités contraires, l_p la largeur d'un pôle et l_a la largeur occupée sur l'induit par un faisceau de conducteurs actifs.

HYPOTHÈSES (Fig. 21).	VALEURS DE k.
A. — Les pôles sont jointifs, $l_p = L$	
a. chaque faisceau induit ne comporte qu'un conducteur, ou bien les conducteurs en sont logés dans une même rainure étroite du noyau magnétique.	1,000
b. les faisceaux induits couvrent la moitié de la face de l'armature opposée aux pôles, $l_a = \frac{1}{2} L$. . . .	0,820
c. les faisceaux couvrent toute la face, $l_a = L$ . . .	0,580
B. — Les intervalles entre les pôles sont égaux à la moitié de la largeur de ceux-ci, $l_p = \frac{2}{3} L$ et le noyau de l'induit présente trois rainures en regard de chaque pôle	
a. les conducteurs de chaque faisceau induit sont réunis dans une seule rainure.	1,225
b. ils sont partagés entre deux rainures voisines . .	1,060
c. ils occupent les trois rainures	0,815
C. — Les pôles sont séparés par des intervalles aussi larges qu'eux-mêmes, $l_p = \frac{1}{2} L$	
a. les faisceaux couvrent la moitié de la face de l'armature, $l_a = \frac{1}{2} L$	1,160
b. ils en couvrent toute la face, $l_a = L$	0,820
D. — L'intervalle entre les pôles est double de la largeur de ces derniers, $l_p = \frac{1}{3} L$	
a. les faisceaux couvrent un tiers de la face de l'armature, $l_a = \frac{1}{3} L$	1,420

Digitized by Google

La recherche analytique de la valeur du coefficient k conduit le plus souvent à des intégrations difficiles, sinon impossibles.

Sa prédétermination graphique, d'après l'épure de l'alternateur, paraît facile, dans tous les cas, en ayant recours au procédé que suggèrent les considérations suivantes.

De l'équation (1) l'on tire

$$k = \frac{E_{eff}}{n\,p\,N\,\mathfrak{T}};$$

d'où, en divisant les deux termes du second membre par p,

$$k = \frac{\frac{1}{p}E_{eff}}{\frac{n}{p}p\,N\,\mathfrak{T}} = \frac{p}{n}\cdot\frac{\frac{1}{p}E_{eff}}{e_{moy}}.$$

D'autre part, remarquons que l'induit des alternateurs à pôles de noms contraires comporte p faisceaux de conducteurs actifs, et celui des machines à pôles de même nom p couples de faisceaux semblablement placés par rapport aux pôles inducteurs et dont les forces électromotrices résultantes partielles sont, par suite, en phase, de telle sorte que la valeur efficace de chacune d'elles est égale à la $p^{ième}$ partie de la force électromotrice efficace totale de l'armature. Il en résulte que le coefficient k a pour valeur le produit de $\frac{p}{n}$ par le rapport de la force électromotrice efficace d'un seul faisceau induit ou de l'ensemble de deux faisceaux voisins, suivant qu'il s'agit d'une machine de la première ou de la seconde catégorie, à la force électromotrice moyenne d'un conducteur actif considéré isolément.

Par définition des valeurs efficaces et moyennes des

Digitized by Google

fonctions périodiques, le rapport précédent est égal au quotient de la racine carrée de l'ordonnée moyenne du diagramme figurant les variations du carré de la somme des forces électromotrices instantanées engendrées, selon le cas, dans les conducteurs d'un faisceau induit ou de deux faisceaux contigus, divisée par l'ordonnée moyenne du diagramme des variations de la force électromotrice d'un seul des conducteurs, les variations étant considérées chaque fois entre deux valeurs nulles et les diagrammes tracés à la même échelle, d'ailleurs arbitraire.

Or, ces diagrammes peuvent être déterminés par points, pourvu qu'on connaisse le nombre des conducteurs actifs des faisceaux induits et leur emplacement sur l'armature, ainsi que la configuration des pôles inducteurs et leur répartition autour de l'induit. Pour en obtenir les éléments, il suffit de diviser, sur une épure du système, la circonférence joignant les milieux des surfaces polaires en un nombre convenable de parties égales, de supposer l'induit animé, par rapport à l'inducteur, d'un mouvement intermittent faisant passer successivement chaque conducteur actif d'une division à la suivante, et d'attribuer à chacun des conducteurs, pendant le déplacement élémentaire, une force électromotrice instantanée proportionnelle à la densité du flux inducteur coupé et à la longueur de conducteur soumise à l'induction.

Pour montrer l'application de la méthode, évaluons la valeur du coefficient k dans une couple de cas particuliers.

Il s'agira, par exemple, de machines avec induits à tambour entourés de pôles inducteurs de forme rectangulaire : dans ces conditions, la longueur des conducteurs induits couverte par les pôles est constante sur toute l'étendue de ces derniers.

1er cas :

Alternateur à pôles de noms contraires de même lar-

Digitized by Google

geur que les intervalles qui les séparent ($l_1 = \frac{1}{2}$ L); faisceaux induits aussi larges que les pôles ($l = \frac{1}{2}$ L); 9 conducteurs juxtaposés par faisceau (fig. 22).

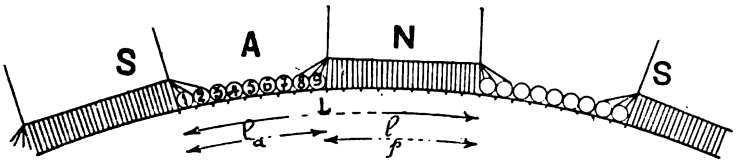


Fig. 22.

On sait que $\frac{p}{n}$ est égal à l'inverse du nombre de conducteurs actifs par faisceau, lorsque l'inducteur est à pôles de noms contraires.

Partageons la largeur totale d'un pôle et des intervalles interpolaires adjacents en $9 \times 3 = 27$ parties égales et, à défaut de renseignements précis sur la distribution du flux magnétique inducteur que pourrait fournir l'étude expérimentale de la carcasse d'une machine du même genre, admettons que la densité des lignes de force est uniforme sous les pôles et que le champ magnétique de l'entrefer s'étale latéralement de telle sorte que son intensité soit égale à la moitié de l'intensité sous les pôles dans l'étendue de la division de l'intervalle interpolaire la plus proche des pôles, égale au quart dans l'étendue de la division suivante et nulle au-delà.

Considérons le faisceau induit A, déplacé, à cet effet, vers la droite, d'une demi division par rapport à la position qu'il occupe dans la fig. 22, au moment où l'axe du conducteur extrême n° 9 est au droit du pôle N, et imaginons qu'il progresse sous ce pôle.

En prenant comme unité la force électromotrice instantanée, constante dans notre hypothèse, induite dans un conducteur actif durant son passage sous un pôle, on peut dresser le tableau que voici :

Digitized by Google

DÉPLACEMENTS ÉLÉMENTAIRES DU FAISCEAU INDUIT (Fig 23).			NOMBRES PROPORTIONNELS AUX FORCES ÉLECTROMOTRICES INSTANTANÉES CORRESPONDANTES, INDUITES DANS LES CONDUCTEURS Nos 1 2 3 4 5 6 7 8 9	A LA FORCE ÉLECTROMOTRICE INSTANTANÉE TOTALE DU FAISCEAU.	AU CARRÉ DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE PRÉCÉDENTE.
De la position	I à	II	— ¼ 0 0 0 0 0 + ¼ + ½ + 1	1,50	2,25
	II à	III	0 0 0 0 0 + ¼ + ½ + 1 + 1	2,75	7,56
	III à	IV	0 0 0 0 + ½ + ¾ + 1 + 1 + 1	3,75	14,10
	IV à	V	0 0 0 + ¼ + ¾ + 1 + 1 + 1 + 1	4,75	22,60
	V à	VI	0 0 + ½ + ½ + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	5,75	33,10
	VI à	VII	0 + ¼ + ½ + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	6,75	45,60
	VII à	VIII	+ ¼ + ½ + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	7,75	60,10
	VIII à	IX	+ ½ + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	8,50	72,30
	IX à	X	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	9,00	81,00
	X à	XI	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + ½	8,50	72,30
	XI à	XII	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + ¾ + ¼	7,75	60,10
	XII à	XIII	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + ½ 0	6,75	45,60
	XIII à	XIV	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + ¾ 0 0	5,75	33,10
	XIV à	XV	+ 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + ¼ 0 0 0	4,75	22,60
	XV à	XVI	+ 1 + 1 + 1 + ½ + ¼ 0 0 0 0	3,75	14,10
	XVI à	XVII	+ 1 + 1 + ½ ¼ 0 0 0 0 0	2,75	7,56
	XVII à	XVIII	+ 1 + ½ 0 0 0 0 0 — ¼	1,50	2,25
	XVIII à	XIX	+ ½ + ¼ 0 0 0 0 — ¼ — ½	0,00	0,00
			Total 10,5		Total 596,22

Digitized by Google

Les déplacements considérés dans le tableau correspondent à une onde positive de la force électromotrice totale du faisceau et de la force électromotrice partielle du conducteur n° 5.

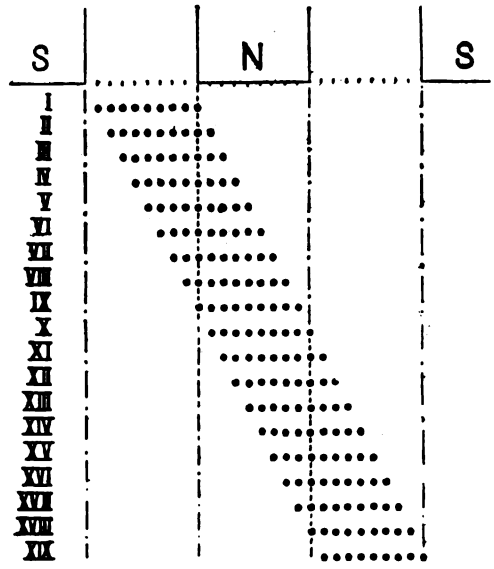


Fig. 23.

Les chiffres de la dernière colonne et ceux de la colonne relative à ce conducteur permettent donc de tracer les diagrammes dont il a été question plus haut. Ce tracé n'est d'ailleurs pas indispensable. Puisque les sommes de 18 ordonnées équidistantes des diagrammes sont respectivement 596,22 et 10,5, les ordonnées moyennes de ceux-ci sont sensiblement $\frac{596,22}{18} = 33,1$ et $\frac{10,5}{18} = 0,584$.

On a donc

$$k = \frac{1}{9} \cdot \frac{\sqrt{33,1}}{0,584} = 1,094.$$

Digitized by Google

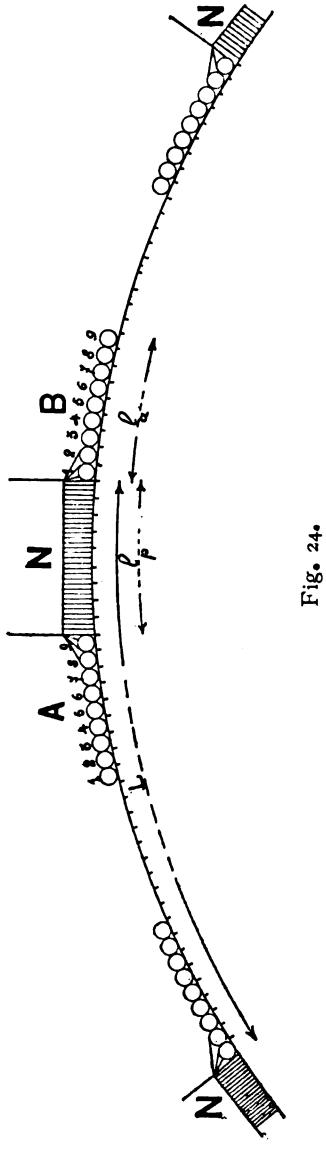


Fig. 24.

En supposant les champs magnétiques limités aux contours des pôles, on retrouve le coefficient 1,16 indiqué dans le tableau des valeurs calculées par MM. Kapp et Görges. Le coefficient k varie d'ailleurs très peu avec le nombre des conducteurs du faisceau ; c'est ainsi que, dans l'hypothèse précédente, sa valeur passe de 1,19 à 1,15 lorsque le nombre des conducteurs juxtaposés du faisceau croît de 3 à 101.

2me cas :

Alternateur à pôles de même nom séparés par des intervalles trois fois plus larges que les pôles ($l_p = \frac{1}{4}$ L) ; faisceaux induits de même largeur que les pôles ($l_a = \frac{1}{4}$ L) ; 9 conducteurs actifs juxtaposés par faisceau (fig. 24).

Pour les alternateurs à pôles de même nom, $\frac{p}{n}$ est égal à l'inverse du double du nombre de conducteurs par faisceau.

Divisons la largeur totale d'un pôle et des intervalles interpolaires attenants en $9 \times 7 = 63$ parties égales et faisons, au sujet de la répartition des lignes de force magnétique, les mêmes hypothèses que dans le cas précédent. Nous avons, cette fois, à considérer l'ensemble de deux faisceaux induits voisins A et B, que nous supposerons encore, dans leur position initiale, déplacés d'une demi division vers la droite par rapport à leur position dans la fig. 24.

On obtient le tableau suivant.

Digitized by Google

DÉPLACEMENTS ÉLÉMENTAIRES DES FAISCEAUX INDUITS (Fig. 25).	NOMBRES PROPORTIONNELS AUX FORCES ÉLECTROMOTRICES INSTANTANÉES CORRESPONDANTES, INDUITES DANS LES CONDUCTEURS																	A LA FORCE ÉLECTROMOTRICE INSTANTANÉE TOTALE DE L'ENSEMBLE DES DEUX FAISCEAUX.	AU CARRÉ DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE PRÉCÉDENTE.
	Nos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		DU FAISCEAU A.									DU FAISCEAU B.									
De la position I à	II	0	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$-\frac{1}{4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1,50	2,25
II à	III	0	0	0	0	0	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,75	7,56
III à	IV	0	0	0	0	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,75	14,10
IV à	V	0	0	0	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,75	22,60
V à	VI	0	0	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,75	33,10
VI à	VII	0	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,75	45,60
VII à	VIII	$+\frac{1}{4}$	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,75	60,10
VIII à	XI	$+\frac{1}{2}$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,50	72,30
IX à	X	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,00	81,00
X à	XI	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,50	72,30
XI à	XII	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,75	60,10
XII à	XIII	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,75	45,60
XIII à	XIV	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,75	33,10
XIV à	XV	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,75	22,60
XV à	XVI	$+1$	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,75	14.10
XVI à	XVII	$+1$	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,75	7,56
XVII à	XVIII	$+1$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{4}$	1,50	2,25
XVIII à	XIX	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{2}$	0,00	0,00
																				Total	596,22

Digitized by Google

Les forces électromotrices élémentaires sont affectées de signes contraires dans les deux faisceaux, parce qu'elles agissent en sens opposés dans le circuit induit.

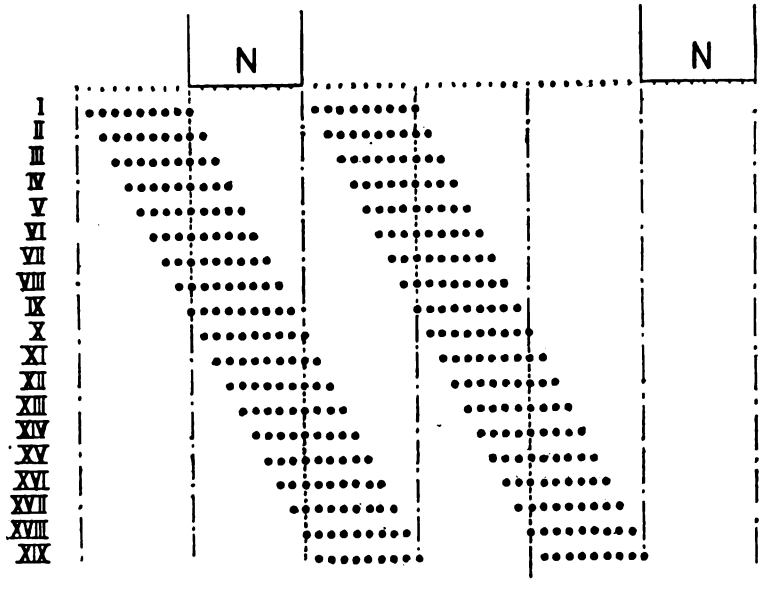


Fig. 25.

Les 18 déplacements précédents déterminent, ici aussi, une demi onde positive de la force électromotrice alternative totale de l'ensemble des deux faisceaux, de sorte que la valeur efficace de celle-ci est proportionnelle à $\sqrt{\frac{596,22}{18}}$. Mais l'onde de la force électromotrice pulsatoire induite dans l'un des conducteurs actifs correspond au passage de ce conducteur du milieu d'un intervalle interpolaire au milieu de l'intervalle suivant. Ce passage comporte, dans le cas actuel, 36 déplacements élémentaires du conducteur, pendant lesquels les forces électro-

Digitized by Google

motrices, dont celui-ci est le siège, varient proportionnellement à la suite des nombres

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{2}$ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0,

dont la somme est 10,5; leur valeur moyenne est, par suite, proportionnelle à $\frac{10,5}{36}$.

On trouve, dans ces conditions,

$$k = \frac{1}{2 \times 9} \cdot \frac{\sqrt{\frac{596,22}{18}}}{\left(\frac{10,5}{36}\right)} = 1,094.$$

C'est la même valeur que dans le premier cas.

(A suivre.)

M. Mélotte. Je traduis les applaudissements de l'Assemblée en remerciant M. De Bast de la remarquable étude dont il a fait le fond de son discours inaugural et en lui présentant les félicitations de tous au sujet du talent qu'il a montré dans l'exposition de ce travail.

La séance est levée à une heure.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Michel Biske avec Mlle Jeanne Livron.

* * *

Exposition internationale de Bruxelles 1897. Section des sciences.

L'Exposition internationale, qui doit s'ouvrir à Bruxelles en 1897, comprendra une Section internationale des Sciences divisée en sept classes : Mathématiques et Astronomie, Physique, Chimie, Géologie et Géographie, Biologie, Anthropologie et Bibliographie. Divers avantages sont accordés aux participants, qui n'auront notamment rien à payer pour les emplacements, et jouiront de réductions de taxes sur les transports par chemin de fer.

A l'occasion de cette Exposition, le Gouvernement belge a mis au concours des séries de questions (Desiderata et Questions de concours), en affectant des primes en espèces aux meilleures solutions. Parmi ces concours, il s'en trouve un certain nombre formulés par la Section des Sciences et jouissant d'un ensemble de primes s'élevant à 20 000 francs.

Des brochures contenant de plus amples explications sont à la disposition de tous ceux qui en feront la demande au Commissariat général du Gouvernement, 17, rue de la Presse, à Bruxelles.

Digitized by Google

* * *

CLASSE 81. — PHYSIQUE.

L'Exposition internationale de Bruxelles en 1897 comprendra une Section spéciale des Sciences (section 5bis), qui sera consacrée exclusivement aux sciences pures, dégagées de toute idée commerciale ou industrielle.

Les savants sont invités à y produire leurs travaux et à faire connaître les résultats qu'ils ont obtenus et les méthodes qu'ils ont suivies, soit par l'exposition des instruments spéciaux qui leur ont servi, soit par celle de photographies ou de schémas explicatifs, ou même par les ouvrages ou brochures qui ont rendu compte de ces travaux.

Il est spécialement insisté sur l'utilité de la production de courtes notices, même sous forme d'étiquettes, permettant au public de se rendre compte des méthodes exposées, de leur portée et des résultats obtenus.

Il est fait également appel au concours des institutions et des sociétés savantes pour les prier vivement d'exposer tous les objets présentant un intérêt historique, ou permettant de faire apprécier l'importance de la participation prise par l'institution ou la société au mouvement scientifique du siècle.

Il sera mis, autant que possible, à la disposition des savants qui désireront répéter en public des expériences, soit de manière permanente, soit temporairement, les aides et l'outillage qui leur seront nécessaires.

Des conférences et des démonstrations publiques seront organisées sur les objets exposés et sur les grandes découvertes de la science.

Digitized by Google

La gratuité des emplacements est accordée aux exposants de la Section des Sciences. — Si les objets ne sont pas d'un volume trop considérable, cette gratuité s'étendra à l'usage des armoires destinées à exposer les objets.

Sans entendre assumer la responsabilité des dégâts que peuvent causer le transport et la manutention des appareils, le Bureau s'efforcera de mettre un personnel de gens spéciaux au service de la Section, de manière à assurer que tous les soins possibles seront pris dans le maniement des objets à exposer.

La gratuité du transport sur les chemins de fer belges est acquise. Des réductions sur les prix de transport seront également accordées par les chemins de fer étrangers.

L'Exposition sera ouverte le 24 avril et clôturée au plus tard le 15 novembre.

La Section des Sciences comprend 7 classes : Mathématiques et Astronomie; Physique; Chimie; Géologie et Géographie; Biologie; Anthropologie; Bibliographie.

Les personnes désireuses d'exposer dans la *Classe de Physique* peuvent obtenir tous les détails nécessaires en s'adressant, sans délai, au Bureau de la Classe 81, dont le Président est M. E. ROUSSEAU, professeur à l'Université de Bruxelles, Président de la Commission consultative des Poids et Mesures, 20, rue Vautier, et le Secrétaire, M. L. GERARD, professeur à l'Université libre de Bruxelles, directeur-adjoint de l'Institut Solvay, 6, rue du Méridien, à Bruxelles.

Afin de fixer les idées au sujet de ce qui pourrait être exposé avec avantage dans la Classe 81 *(Physique)*, le Bureau de la Classe signale spécialement les objets suivants :

Digitized by Google

Physique.

A. Appareils et méthodes ayant servi à des recherches de physique. — Photographies des appareils. — Schémas. — Synthèse des résultats. — Notices explicatives.

B. Travaux des sociétés savantes, mémoires et publications des particuliers ou des sociétés relatifs à la physique.

C. Partie historique : Instruments, matériel, résultats, produits des recherches les plus marquantes d'un même physicien. — Listes d'ouvrages et notices explicatives sur ces travaux.

Instruments et matériel de collections de sociétés savantes, ou d'institutions montrant la part qu'elles ont prise dans le mouvement scientifique moderne.

D. Organisation de l'enseignement de la physique : Dispositions élémentaires pour les exercices pratiques. — Plans et photographies de laboratoires de recherches ou de laboratoires d'élèves.

Métrologie.

A. Etalons légaux ou proposés, anciens ou modernes, pour toutes les mesures légales, y compris les mesures électriques.

B. Instruments servant à la métrologie : Comparateurs. — Cathétomètres. — Micromètres. — Densimètres. — Appareils de mesures électriques, etc.

C. Organisation des bureaux officiels des poids et mesures et des laboratoires de mesures y compris les mesures électriques. — Plans et photographies. — Organisation des services privés et publics de comparaison.

D. Publications et résultats des recherches des bureaux et laboratoires de métrologie.

Digitized by Google

Digitized by Google

LISTE DES MEMBRES

(Complément à la liste publiée page 3)

MEMBRES TEMPORAIRES :

MM. ANDREWS, Léopold, lieutenant au 8e régiment d'artillerie, rue de la Trappe, 42, Herstal.

BALACHOVSKY, Dmitri (méc. 1895), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

CALDARERA, Évariste, rue Reynier, 30, Liége.

CENTOZE, Angelo, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore, Liége.

DE ECHEVARRIA, Raphaël (A. et M. 1896), ingénieur, rue Saint-Gilles, 22, Liége.

DELLA GIUSTA, Fausto (civ.), ingénieur, rue Puits-en-Sock, 84, Liége.

DEL MONTE, Angelo (civ.), ingénieur, rue d'Omalius, 24, Liége.

DE MEEUS, Édouard, rue du Vertbois, 25, Liége.

DE MUYSER, Raymond, boulevard de la Sauvenière, 22, Liége.

DERIHON, Ernest (méc. 1896), ingénieur, rue Saint-Laurent, 248, Liége.

DE UBAO, Eduardo (A. et M. 1896), ingénieur, rue de la Cathédrale, 65, Liége.

FORESTI, Augusto (ind.), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

HALLER, Henri, employé technique de la Compagnie Internationale d'Électricité, rue du Pont-d'Ile, 16, Liége.

Digitized by Google

HERARD, rue de la Cathédrale, 61, Liége.

HOURKO, Nicolas (méc. 1891), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

KROLL, Léon (méc. 1896), ingénieur, rue Louvrex, 127, Liége.

LIMAUGE, Eugène (civ. 1893), ingénieur, rue de la Cathédrale, 67, Liége.

NICOLINI, Eugène (ind.), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

NUZZACCI, Bonaventura (ind. 1895), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

PIRARD, Albert, sous-lieutenant d'artillerie, à Voroux-lez-Liers.

POLAIN, Auguste (méc. 1896), ingénieur, quai de l'Industrie, 24, Liége.

PRION, Florent (méc. 1896), ingénieur, rue Louvrex, 92, Liége.

SEGRE, Ettore (méc. 1896), ingénieur, rue de la Cathédrale, 79, Liége.

SVEGINSKI, Michel (méc.), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liége.

TCHERNIAK, T. (méc.), ingénieur, rue des Guillemins, 23, Liége.

THEUNIS, Georges, sous-lieutenant d'artillerie, rue des Guillemins, 23, Liége.

VAN DOOREN, François (A. et M. 1892), ingénieur, rue Dossin, 25, Liége.

WILMET, Henri, sous-lieutenant d'artillerie, fort de Loncin.

Digitized by Google

SÉANCE DU 20 DÉCEMBRE 1896.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. Asbjörnsen, Baert, Berlow, Briffaux, Cassa, Cheftel, De Bast, Del Proposto, de Luboradzki, de Sauteiron, Henrion, Jovignot, L'Hoest, Maus, Mavroïdis, Mélotte, Moriondi, Robert L., Steels, Van der Wallen.

M. De Bast, *président*, fait part de l'empêchement de M. Eric Gerard, en voyage, d'assister à la séance du jour.

Le procès-verbal de la dernière séance, publié au *Bulletin*, est approuvé

M. van der Wallen expose à l'Assemblée le travail suivant dû à la collaboration de M. Mavroïdis et de lui :

Note sur l'emploi des courants biphasés dans l'industrie. — Les courants alternatifs n'étaient pas considérés, il y a quelques années, comme solution heureuse des problèmes sur la distribution et le transport de l'énergie. Les difficultés sérieuses résultant des conditions du bon fonctionnement, contribuèrent au développement progressif des courants continus.

Mais les études de MM. Ferraris et Tesla amenèrent la découverte des courants alternatifs polyphasés. Ceux-ci, grâce aux recherches des éminents électriciens, dont nous parlerons plus loin, prirent dès leurs débuts un immense développement ; aussi sont ils appelés, comme nous le montrerons, à jouer un rôle prépondérant dans l'industrie.

Digitized by Google

Nous avons cru intéressant de résumer l'emploi de ces courants, en passant successivement en revue leur mode de production et d'utilisation, et en faisant ressortir les avantages qu'ils présentent sur les autres modes de production de l'énergie électrique.

GÉNÉRATEURS.

La production des courants biphasés a débuté par l'emploi de deux alternateurs monophasés identiques, dont les arbres sont dans le prolongement l'un de l'autre et manchonnés, de façon que l'un présente un retard de phase de 1/4 de période par rapport à l'autre. Le schéma n° 1 montre le dispositif d'une pareille combinaison pouvant desservir une canalisation à trois ou quatre fils de ligne.

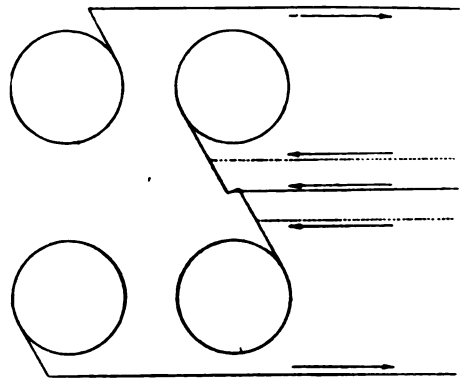


Fig. 1.

Ce dispositif est avantageux au point de vue du réglage de la tension de chacun des deux courants. Il peut se faire au moyen de rhéostats placés au départ ou en un point quelconque de la ligne.

Le réglage s'effectue assez facilement lorsque les géné-

Digitized by Google

ratrices alimentent des réseaux d'éclairage, mais présente des difficultés sérieuses lorsqu'il s'agit d'une distribution d'énergie où les alternateurs possèdent une self-induction notable, pouvant modifier le décalage des phases, par suite d'une différence de charges sur les deux lignes.

Ce dispositif présente, en outre, les inconvénients, d'être : 1° trop coûteux, 2° d'une réalisation souvent difficile.

La présence des inconvénients que nous venons de signaler a conduit à l'emploi de différents procédés pour obtenir le biphasage d'un courant alternatif monophasé. Voici les principaux :

1° Biphasage d'un courant alternatif simple à l'aide d'un transformateur.

Ce procédé, employé par MM. Ferraris et Tesla, consiste à relier l'un des circuits inducteurs du moteur avec le secondaire d'un transformateur faiblement chargé. Quant à l'autre circuit inducteur, on le met en série avec le primaire du transformateur.

La faible charge du secondaire produirait sur le courant primaire un retard de phase sensiblement égal à 1/4 de période par rapport à la tension primaire, à la condition que le circuit magnétique du transformateur ne possède ni hystérésis, ni courants de Foucault. Ce procédé offre les inconvénients d'augmenter le coût de l'installation et de réduire le rendement des moteurs.

2° Biphasage d'un courant alternatif simple à l'aide d'une self-induction.

Ce procédé, dû à M. Tesla, consiste à munir l'un des circuits inducteurs d'une bobine ayant une faible self-induction, tandis que l'autre est muni d'une autre bobine ayant une self-induction considérable, les deux circuits ainsi formés sont mis en dérivation sur le circuit principal.

Digitized by Google

Ce procédé offre aussi l'inconvénient de réduire le rendement des moteurs, par suite du décalage considérable qui résulte de l'introduction d'une grande résistance ohmique dans le deuxième circuit.

3° Biphasage par le procédé bien connu de M. Shallenberger, employé, en principe, dans la confection de son compteur pour courants alternatifs.

Ces modes de biphasage n'ont servi qu'au début de l'application de ces courants, ils n'offrent actuellement qu'un intérêt purement historique.

Un autre procédé de biphasage d'un courant alternatif simple, au moyen de condensateurs, est dû à MM. Leblanc et Hutin, et a servi de base dans leur système de distribution de force par courants alternatifs.

L'emploi des courants biphasés dans l'industrie nécessita une combinaison de deux alternateurs simples en une seule machine, formant un ensemble compact et permettant de conserver à l'installation le réglage distinct de deux courants.

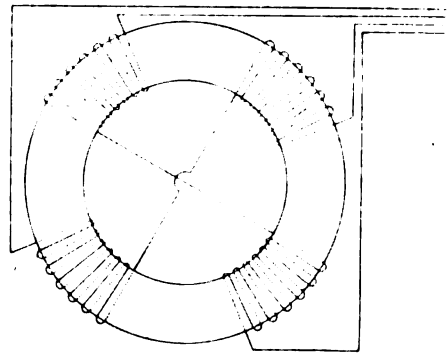


Fig. 2.

Cette combinaison a été réalisée à l'aide des bobinages spéciaux de l'induit dont voici les principaux :

Digitized by Google

1° Le bobinage à enroulements indépendants comportant la liaison entre elles de toutes les bobines en concordance de phase tel que le représente la fig. 2;

2° Le bobinage étoilé consistant à réunir en un point commun les extrémités libres de différentes bobines semblables reliées en séries, tel qu'il est représenté dans la fig. 3;

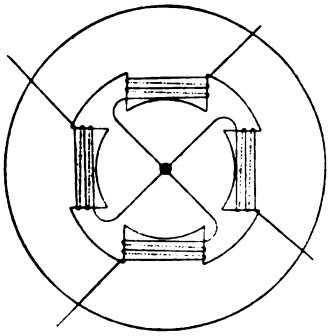


Fig. 3.

3° Le bobinage triangulaire dans lequel toutes les bobines sont connectées entre elles, de façon à former un circuit fermé indiqué dans la fig. 4.

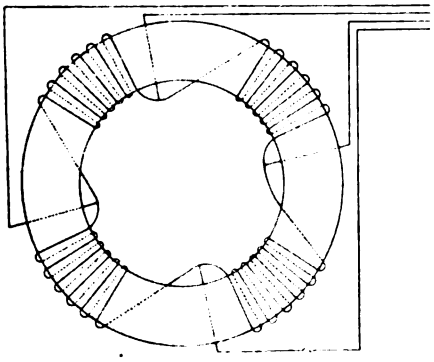


Fig. 4.

Digitized by Google

Si les extrémités des deux séries de bobines en discordance de phase sont réunies par le même fil, cette combinaison constitue les canalisations à trois fils de ligne, fig. 5.

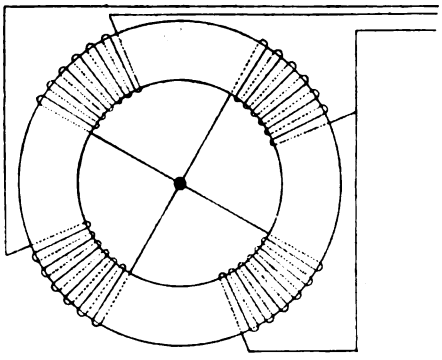


Fig. 5.

Plusieurs maisons de construction ont entrepris la confection des alternateurs biphasés, et nous croyons utile de donner la description sommaire des principaux types employés dans l'industrie.

La Société des établissements Weyher et Richemond, exploitant les brevets C. E. L. Brown, construit des alternateurs biphasés à induit mobile Les bobines inductrices sont disposées radialement et réunies par une couronne en fonte siliciée.

L'induit est composé d'anneaux en tôle de fer ; sur sa surface extérieure sont disposées des galettes de fil, dont celles appartenant à une même phase sont placées à cheval sur celles de l'autre. Leurs extrémités aboutissent à deux bagues sur lesquelles frottent deux bobines.

Ces machines ont une puissance spécifique, un rendement aussi bon que les dynamos. Elles ont l'avantage pour les faibles puissances de limiter les pertes par

Digitized by Google

hystérésis et courants de Foucault, ainsi que la chute de tension dans les conducteurs induits; par contre, leur induit étant mobile, il faut avoir recours à des commutateurs spéciaux, dans le cas de hautes tensions.

La maison Johnson and Phillips, de Londres, construit des alternateurs biphasés dont l'armature est montée sur une forte bague en fonte sur laquelle sont boulonnées les noyaux en fer laminés, qui supportent les bobines induites, Celles-ci étant enroulées indépendamment les unes des autres peuvent se détacher facilement par le desserrage des écrous et se remplacer par d'autres en quelques minutes sans aucune précaution préalable. Le circuit de l'armature se termine par deux bornes en bronze montées sur une plaque d'ébonite et fixées sur une portée convenable de la machine.

Comme l'induit est fixe, on a pas à se préoccuper de la force centrifuge. Cette condition rend très facile l'isolement des bobines; pour un fonctionnement à haut voltage, le mode de construction permet l'accroissement de l'épaisseur de l'isolant entre les bobines et les noyaux et cela sans augmentation de l'entrefer.

La bobine excitatrice est enroulée sur un cylindre court à travers lequel passe l'arbre. Contre les bases de ce noyau sont solidement fixées deux calottes polaires rayonnantes, portant chacune un certain nombre de bras recourbés.

Le système inducteur entier tourne avec l'arbre; la bobine d'excitation est alimentée par un courant issu d'une petite machine indépendante et qui lui est amené par deux paires de balais qui frottent sur deux bagues en bronze montées l'une à côté de l'autre sur une douille en fonte clavetée sur l'arbre.

Le système inducteur mobile constitue un excellent volant qui annule les effets dus aux variations de vitesse

Digitized by Google

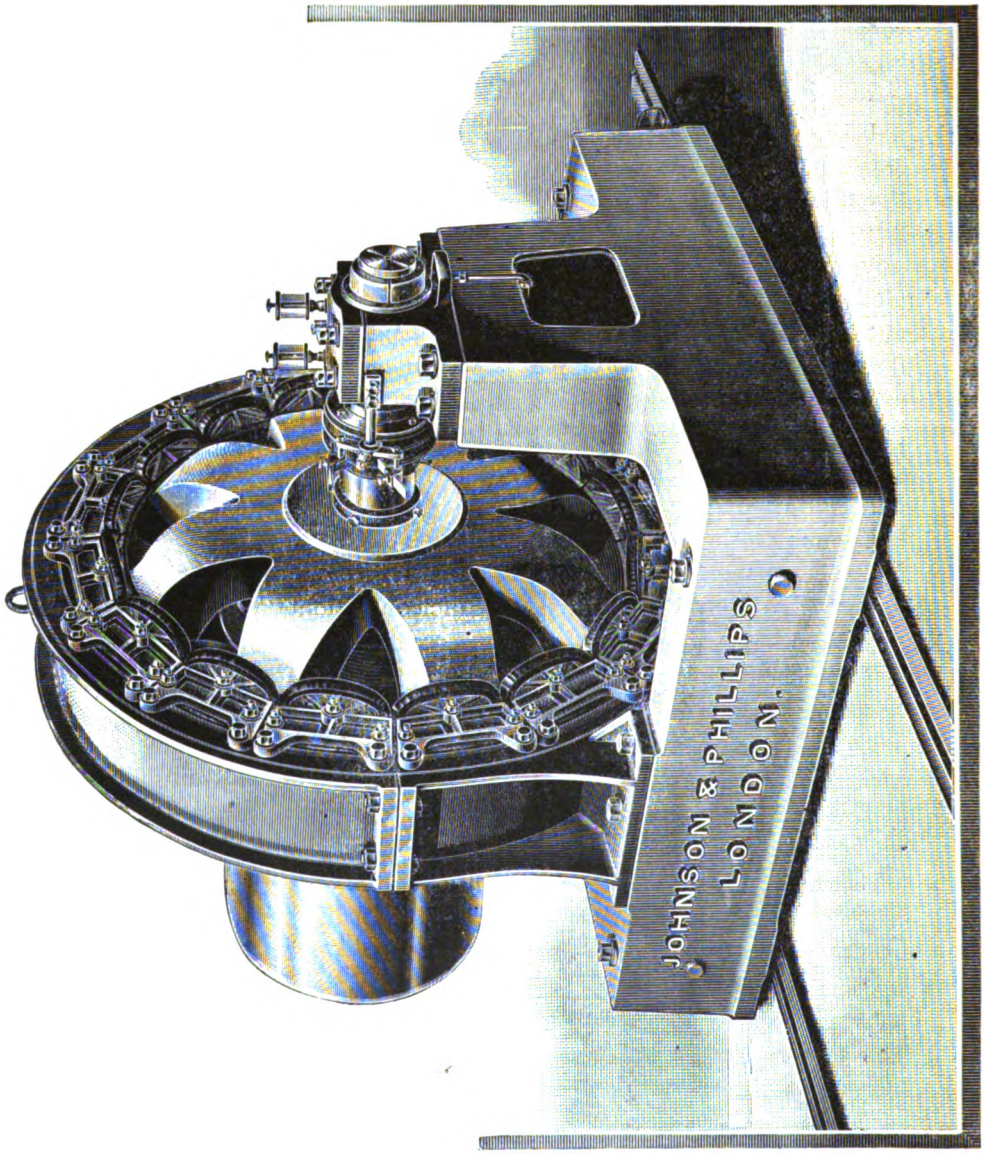


Fig. 6.

Digitized by Google

du moteur qui l'actionne, et, comme aucune partie de l'alternateur n'est sujette à dislocation, une marche à grande vitesse ne présente aucun inconvénient.

Les inducteurs sont presque complètement cachés par la couronne extérieure sur laquelle sont fixés les noyaux d'induit, on élimine ainsi les trop grandes perturbations de l'air par suite de la rotation des pièces polaires.

La fig. 6 montre l'ensemble de cette machine. Elle peut être employée pour toutes les vitesses et toutes les fréquences; sa température augmente peu, le rendement en est élevé et de plus ces alternateurs travaillent très-bien en parallèle.

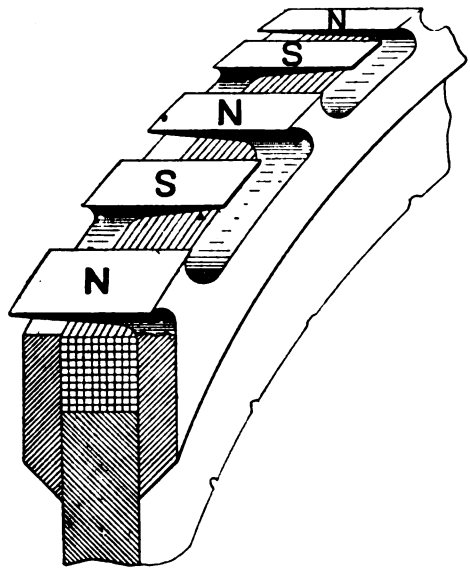


Fig. 7.

La firme C. E. L. Brown Boveri, de Baden (Suisse), construit des alternateurs biphasés à inducteur mobile pourvu d'une bobine excitatrice unique engagée dans la

Digitized by Google

gorge que forme un plateau en fonte et portant vers la périphérie extérieure deux anneaux en acier munis de projections latérales alternées, constituant les pôles inducteurs tels qu'ils sont représentés dans la fig. 7.

L'induit se compose d'un anneau feuilleté et perforé de trous, tout près de sa périphérie intérieure. Ces trous sont destinés à recevoir les conducteurs formant l'enrou-

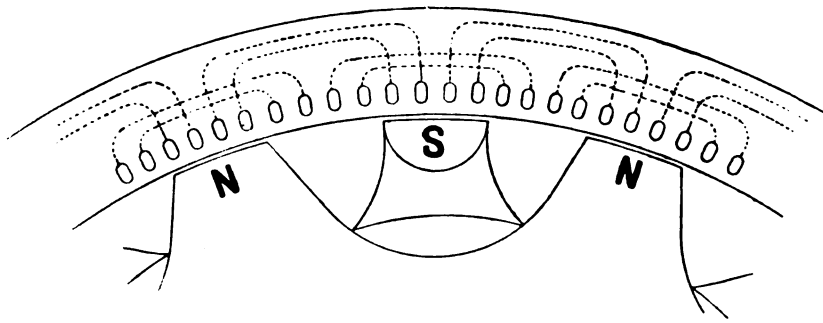


Fig. 8.

lement induit dont les fils de connexion sont disposés en deux séries situées dans deux plans différents.

Schématiquement, le groupement de deux séries d'enroulement peut se représenter comme l'indique la fig. 8.

L'idée de noyer les conducteurs dans l'anneau présente les avantages suivants :

1° L'amélioration de la construction mécanique, par le fait que les conducteurs sont maintenus et entraînés sans aucun frettage;

2° Réduction notable de l'entrefer, et, par suite, diminution de la dépense d'excitation;

3° Absence complète des courants de Foucault dans les conducteurs ainsi noyés;

4° Absence de tout effort tangentiel, dû au champ magnétique, sur les conducteurs encastrés; cet effort s'exerce sur le fer sans aucune action sur le cuivre.

Digitized by Google

Ces dispositions d'inducteur à grande bobine unique doivent néanmoins présenter des inconvénients graves.

1° Ces machines ayant un grand développement de pièces polaires, les déperditions de flux dues aux réactions d'induit sont assez considérables et occasionnent une différence de tension assez grande entre la marche à vide et la marche à pleine charge.

2° Les dilatations et contractions successives de la grande bobine inductrice peuvent occasionner une usure de son isolant. Ce fait peut provoquer la mise en court-circuit d'un certain nombre de spires et amener la mise hors service de l'alternateur.

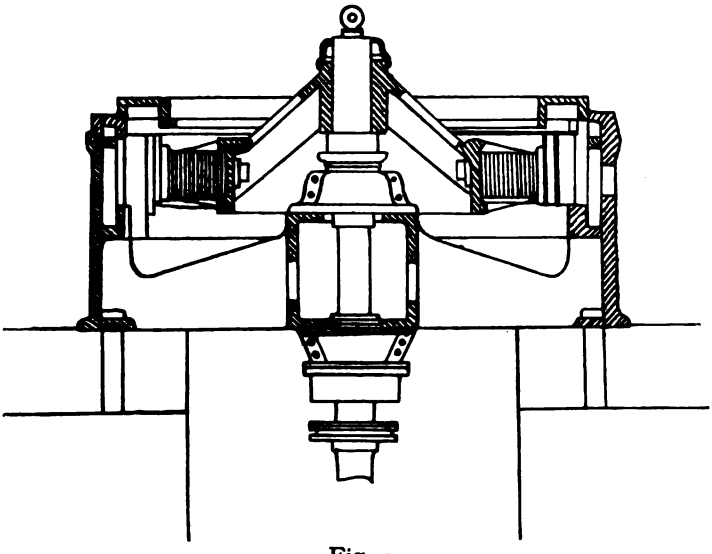


Fig. 9.

Un autre genre d'alternateurs est celui du type « cloche », spécialement construit pour l'accouplement direct avec les turbines.

La maison Brown Boveri construit des génératrices

Digitized by Google

biphasées de ce type à axe vertical, qui ont une grande analogie avec leurs machines à axe horizontal.

L'armature consiste dans une couronne extérieure fixe, l'inducteur mobile placé à l'intérieur de celle-ci est muni de projections radiales polaires.

L'enroulement de l'armature n'est pas visible, les conducteurs étant noyés dans des trous longitudinaux pratiqués tout près de la périphérie intérieure, suivant le procédé de M. Brown.

La formation des courants parasites dans les pièces polaires est évitée et on peut construire celles-ci d'une seule pièce.

L'inducteur ayant la forme d'une cloche est en acier fondu et son enroulement est réparti entre 28 bobines couvrant un nombre égal de pôles consolidés par des boulons comme l'indique la fig. 9, donnant la coupe verticale de la machine.

Quand à la fig. 10, elle donne la projection en plan de la machine sur laquelle on voit la disposition de l'organe inducteur. Une particularité que possède cette machine

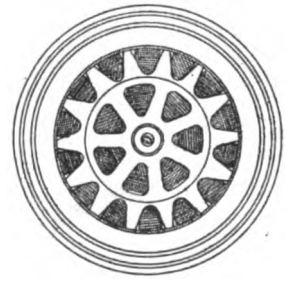


Fig. 10.

consiste dans la disposition du support de l'arbre placé au dessous du corps de l'inducteur ; le but de celle-ci est de simplifier la construction et faciliter les réparations.

Digitized by Google

Des génératrices type « cloche » ont été construites, d'après les plans de M. Forbes, par la Compagnie Westinghouse, à Pittsburg, et utilisées dans l'usine centrale des chutes du Niagara.

Les détails de construction, ainsi que les vues des génératrices de cette importante installation, ont été publiés dans l'*Électrical Engineer* du 16 janvier 1896.

On peut encore constituer des génératrices biphasées au moyen des dynamos à courant continu, en divisant l'enroulement de l'induit en quatre parties. Celles-ci sont en communication avec quatre bagues sur lesquelles frottent des balais servant à recueillir le courant. Ce mode de production des courants biphasés se prête peu aux hautes tensions.

Il ne faut pas cependant perdre de vue que les génératrices fournissant des courants de haute tension présentent des dangers d'isolement et nécessitent des précautions spéciales pour la sécurité du personnel.

Voici, en résumé, les conditions que doit remplir un alternateur :

1° La chute de tension entre la marche à vide et la marche à pleine charge (à excitation constante) doit être aussi faible que possible. Cette chute est fixée à 15 % maximum pour le circuit des moteurs et à 5 % pour le circuit des lampes ;

2° Leur facteur de puissance doit prendre différentes valeurs suivant qu'il se trouve :

a. Sur un circuit d'éclairage ;

b. » » » de moteurs ;

c. » » » mixte.

Dans le 1er de ces trois cas, le décalage est sensiblement nul.

Dans le 2e cas, leur facteur de puissance est compris entre 0,65 et 0,85.

Enfin, dans le 3e cas, entre 0,70 et 0,75.

Digitized by Google

Accouplement des Génératrices. — La théorie du couplage des alternateurs nous montre que, pour que deux ou plusieurs machines à courants alternatifs ou polyphasés puissent fonctionner simultanément, il faut que le temps périodique des alternativités de l'une d'elles soit exactement égal au temps périodique de celle de l'autre. De plus, elles ne peuvent être disposées en série de façon à ajouter leurs forces électromotrices; elles doivent être reliées en quantité par rapport au circuit utile. Elles marcheront synchroniquement lorsque leurs phases seront en opposition.

Des considérations d'ordre plus pratique montrent encore que chaque alternateur doit être conduit par un moteur indépendant proportionné à sa puissance. Les différents moteurs seront pourvus d'un régulateur unique placé sur la conduite principale et actionné par un petit moteur synchrone placé sur la canalisation électrique.

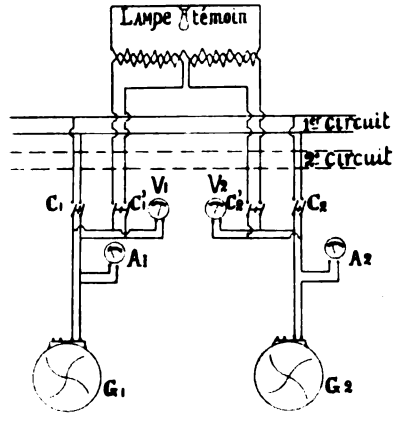


Fig. 11.

Cela étant, soient deux alternateurs G_1 et G_2 à accoupler, G_1 est déjà en service. La machine G_2 sera mise en

Digitized by Google

marche à circuit ouvert et excitée jusqu'à ce que son voltmètre V. marque sensiblement le voltage du réseau indiqué par V_1. On abaisse les clefs c'_1 et c'_2 du synchroniseur de phase. Lors de l'extinction de la lampe témoin, ce qui indique que les machines sont en concordance de phase par rapport au circuit extérieur, on abaisse le conjoncteur c_2. On règle ensuite la vitesse jusqu'à ce que l'ampèremètre A_2 indique le même courant que celui de G_1. Le dispositif de ce mode d'accouplement est représenté dans la fig. 11.

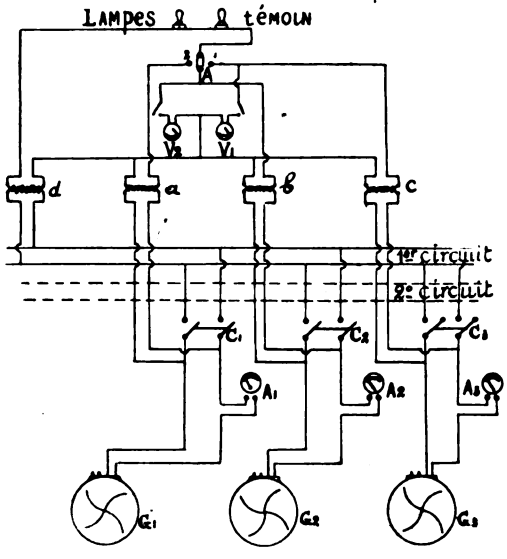


Fig 12.

Celui-ci très simple lors de l'emploi de deux alternateurs devient assez compliqué lorsqu'il s'agit d'une station comportant un grand nombre de machines devant pouvoir s'accoupler dans un ordre quelconque.

On préfère dans ce cas adopter le dispositif suivant

Digitized by Google

dans lequel l'opposition de phase des machines est marquée par l'incandescence du filament de la lampe témoin.

Sur une phase de chaque alternateur est dérivé, comme le représente la fig. 12, le primaire d'un transformateur; le primaire d'un transformateur auxiliaire est dérivé par rapport à la canalisation. Les différents secondaires peuvent successivement être mis en série avec le secondaire de ce dernier. S'il s'agit, par exemple, d'accoupler G_2 et G_3, G_3 étant en service, on opérera comme suit : La clef A dans sa position (1) fait marquer à V_1 le voltage de la canalisation; dans la position (2), celle de G_2. On attendra pour abaisser le conjoncteur C_1 que les lampes témoins brûlent d'un vif éclat, ce qui nous indiquera la concordance de phase par rapport au circuit extérieur, puisque les secondaires des transformateurs *c* et *d* sont en série et parcourus par un courant de même sens.

Plusieurs autres dispositifs ont encore été employés pour le couplage des alternateurs. Nous ne les décrirons pas, ils ne présentent relativement à ceux-ci qu'un intérêt secondaire.

MOTEURS.

Dans ce qui précède, nous avons résumé le mode de production des courants biphasés dont l'énergie développée est utilisée à des distances plus ou moins grandes du lieu de production.

A cet effet, la construction des appareils récepteurs spéciaux pouvant fonctionner dans les meilleures conditions possibles, fut la question la plus importante dans l'emploi de ces courants.

Le grand inconvénient que présentent les alternomoteurs monophasés de ne pouvoir démarrer automatiquement, a été annulé par la découverte des moteurs à champ tournant.

Digitized by Google

Ils peuvent être considérés comme de simples transformateurs rotatifs, dont les enroulements fixe et mobile constituent respectivement les circuits primaire et secondaire.

Les moteurs à champ tournant se divisent en deux catégories :

1° Les moteurs synchrones.

2° Les moteurs asynchrones.

MOTEURS SYNCHRONES.

Les premiers se distinguent en ce que leur vitesse angulaire est indépendante de leur charge et ne dépend que de la fréquence du courant d'alimentation.

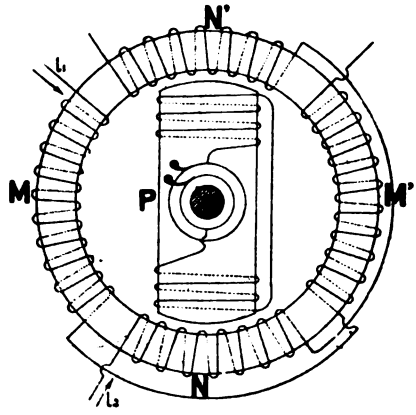


Fig. 13.

En suivant le raisonnement de MM. Rodet et Busquet, considérons un moteur synchrone biphasé type Tesla, dont l'inducteur est un anneau enroulé de deux paires de bobines MM' et NN' et dont chaque paire occupe une demi-circonférence. Le dispositif de ce moteur est représenté fig. 13. La paire de bobines MM' reçoit le courant i_1

Digitized by Google

et celle de NN' le courant i_2 ; le champ magnétique obtenu, est dirigé suivant un diamètre et tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre. La partie du circuit magnétique qui ne reçoit pas le courant biphasé est constitué par un électro-aimant P, possédant un enroulement dont les extrémités aboutissent à deux bagues métalliques isolées; cet enroulement, à la mise en marche du moteur, est mis en court-circuit ou fermé sur une résistance reliée aux balais. Mais un pareil moteur présente l'inconvénient de tourner avec une vitesse angulaire excessive, surtout quand celui-ci est de faible puissance. En effet, si nous supposons que la fréquence $n = 50$, le moteur tournera avec une vitesse angulaire de $50 \times 60 = 3{,}000$ tours par minute; vitesse fort peu commode pour les besoins industriels.

Tesla a modifié sa machine en augmentant le nombre des pôles tournants, de cette façon si p désigne le nombre de pôles, la vitesse angulaire sera exprimée par le quotient de la fréquence, par le nombre de paires de pôles, c'est-à-dire par $\frac{n}{\frac{p}{2}}$.

Le nombre des bobines enroulées dans l'anneau sera de $2p$ alternant dans un sens et dans l'autre, et montées en deux séries distinctes dont l'une recevra le courant i_1 et l'autre le courant i_2.

Dans le schéma que nous donnons fig. 14, le dispositif représente un moteur à 8 pôles ; en supposant que la fréquence est $n = 50$, la vitesse angulaire de cette machine sera de :

$$\frac{n}{\frac{p}{2}} \times 60 = \frac{50}{4} \times 60 = 750 \text{ tours par minute.}$$

Digitized by Google

On pourra donc réduire la vitesse angulaire soit en diminuant la fréquence, soit en augmentant le nombre des paires de pôles Nous verrons dans ce qui suit que la fréquence ne doit pas descendre au-delà de certaines limites.

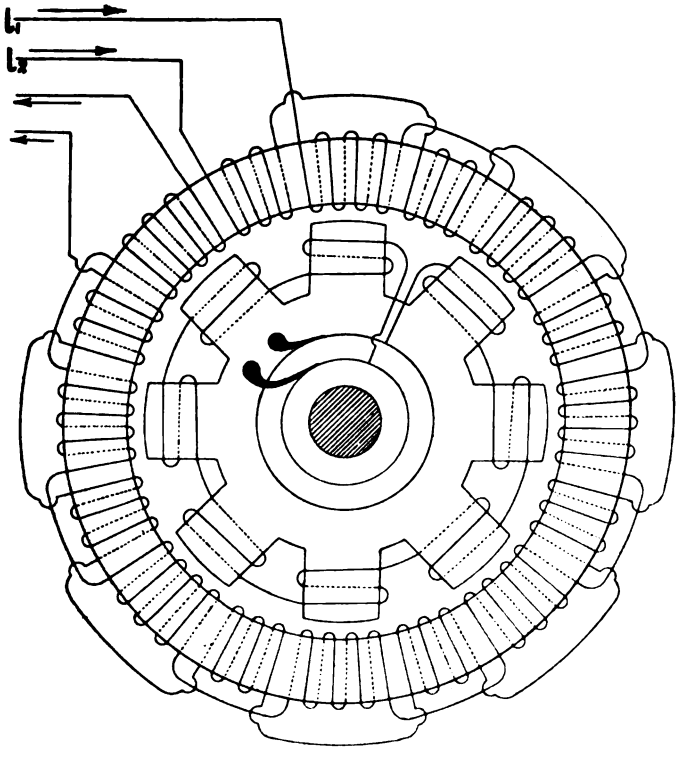


Fig. 14.

De ce qui précède, nous concluons que tout alternateur polyphasé synchrone peut constituer un moteur synchrone à champ tournant, présentant l'avantage de pouvoir démarrer automatiquement.

Digitized by Google

Ces machines sont donc réversibles comme celles à courant continu. De ces dernières, on peut constituer encore des moteurs biphasés synchrones de la même façon que celle que nous avons mentionnée en parlant des génératrices.

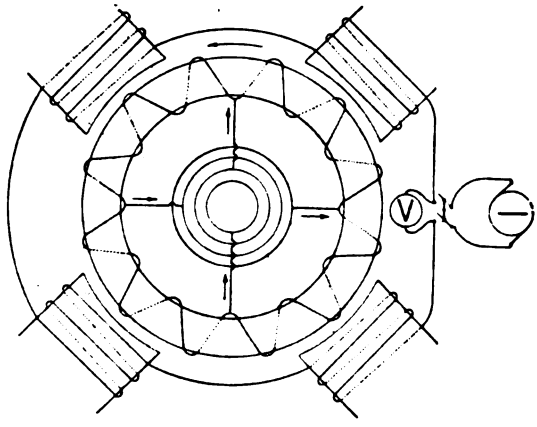


Fig. 15.

Une telle combinaison a été réalisée par M. Schückert dans la confection de son moteur qu'on rencontre fréquemment dans l'industrie. Le schéma représenté dans la fig. 15 montre le dispositif de cet appareil qui comprend deux collecteurs, l'un étant formé par quatre bagues métalliques isolées entre elles et reliées chacune à une série de points équidistants de l'enroulement; l'autre (non représenté sur la figure), c'est le collecteur ordinaire de la dynamo, lequel a pour but d'alimenter l'excitation du moteur lorsque celui-ci est de faible ou de moyenne puissance.

Pour des moteurs de grande puissance, il est préférable d'employer une excitatrice séparée.

Ce genre de moteur démarre en charge à la condition

Digitized by Google

essentielle que le circuit d'excitation ne soit fermé que lorsque le moteur a atteint sa marche synchrone.

En effet, celui-ci ne tournant pas synchroniquement, les lignes de force émises par l'anneau subissent des dérivations dans l'air; il en résulte donc, que le flux qui traverse les noyaux de fer varie constamment; si donc on excitait les électros pendant cette période de fonctionnement, le moteur s'arrêterait, car l'attraction que subit l'organe mobile de la part des électros n'agirait pas toujours dans le même sens. Par contre, le moteur tournant synchroniquement, si on excite ceux-ci, les pôles engendrés dans l'anneau se maintiennent constamment en regard des pièces polaires, et le flux qui traverse les noyaux de fer reste sensiblement constant. De là résulte la nécessité de fermer le circuit d'excitation, lorsque le moteur a atteint sa marche synchrone, moment que l'on peut saisir par l'emploi d'un voltmètre ordinaire relié aux extrémités du circuit d'excitation. Voir fig. 15.

Pendant la mise en marche, l'instrument indiquera une forte déviation, résultant de la force électromotrice induite dans l'enroulement inducteur; au fur et à mesure que la marche tend vers le synchronisme, les déviations du voltmètre diminuent et s'annulent lorsque celui-ci est atteint.

On saisit ce moment pour fermer le circuit d'excitation et le voltmètre intercalé continuera alors à indiquer la tension du courant d'excitation

Cette machine, comme toutes celles du genre des dynamos transformées, peut remplir les fonctions suivantes:

1° De dynamo à courant continu ordinaire;

2° D'alternateur auto-excitateur ou non, simple ou biphasé;

3° De moteur ordinaire à courant continu;

4° » » biphasé;

Digitized by Google

5° De transformateur de courant biphasé en courant continu ;

6° De transformateur de courant continu en courant biphasé.

C'est avec raison donc qu'on a donné à cette originale machine, le nom de « *Machine Omnibus* », mais nous aimerions mieux lui donner le nom de « *Machine polymorphique* »: l'étymologie de ce qualificatif, attribué par M. Hospitalier aux appareils destinés à transformer des courants d'une certaine espèce en courants d'une autre, nous semble mieux attribuée à cet appareil, qui peut, en outre, remplir simultanément plusieurs de ces fonctions. Sous cette forme, on la rencontre dans une installation de la Cie Westinghouse, à Rochester, où l'on utilise comme dynamo une machine à 8 pôles fournissant du courant continu pour la traction à 550 v. et du courant biphasé sous une tension efficace de 385 v , avec une fréquence de 50 périodes par minute, ce dernier courant étant destiné à alimenter des moteurs biphasés qui le transforment pour l'éclairage des lampes par incandescence.

Un dispositif analogue à celui de M. Schückert, pour la réalisation des moteurs biphasés sans avoir recours aux propriétés du champ tournant, est dû à M. Bradley.

MOTEURS ASYNCHRONES.

Dans ce genre de moteurs, la partie mobile est entraînée par le couple moteur qui prend naissance sous l'action des courants induits circulant dans les enroulements fermés de l'armature, et engendrés par les champs magnétiques produits par l'inducteur, alimenté par les courants biphasés de la ligne. Il est à remarquer toutefois que ce couple moteur se développe dans le cas où l'induit, étant supposé mobile, tourne avec une vitesse inférieure à celle qui correspond au synchronisme.

Digitized by Google

Cette remarque essentielle a été confirmée d'après les expériences de M. Brown et de la « *Général Electric Company* », qui ont procédé à la réversibilité des machines biphasées.

Comme type de moteurs asynchrones à champ tournant nous signalerons : celui construit par la maison Brown Boveri, de Baden. L'organe mobile de ces appareils a la forme d'une cage d'écureuil, aux tiges de cuivre engagées dans les trous du noyau. Celui-ci est formé par des disques en tôle douce légèrement isolés. Les trous sont poinçonnés très près de la périphérie extérieure de l'organe mobile dont chacune des extrémités porte une plaque métallique épaisse, pour la consolidation de l'organe. Les

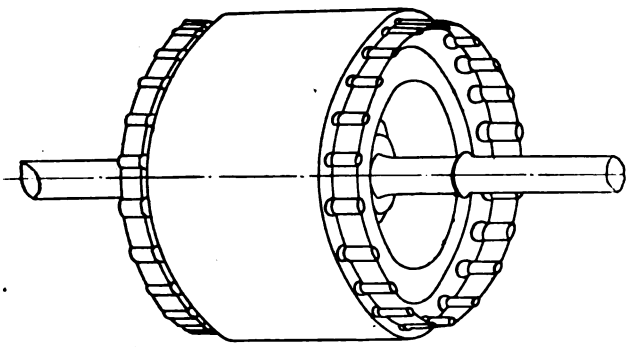


Fig. 16.

tiges ainsi engagées sur la périphérie de l'anneau sont mises en court-circuit au moyen d'une couronne en cuivre ou maillechort placée de part et d'autre comme l'indique la fig. 16. Cette forme et la construction de l'organe mobile évitent les courants de Foucault dans les tiges, ainsi que l'échauffement du noyau. M. Brown a adopté ce dispositif après de nombreuses expériences qui ont justifié ses avantages.

Digitized by Google

Quant à l'organe fixe du moteur, il est formé de disques en tôle percés de trous dans lesquels sont enroulées les bobines protégées par de forts tubes en papier spécialement préparé.

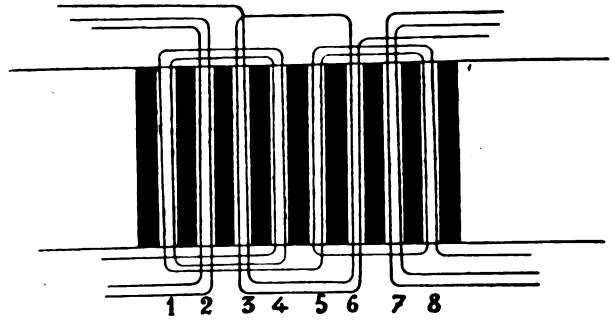


Fig. 17.

Le principe de l'enroulement de l'organe fixe est représenté, fig. 17, donnant le développement en plan de deux spires par bobine.

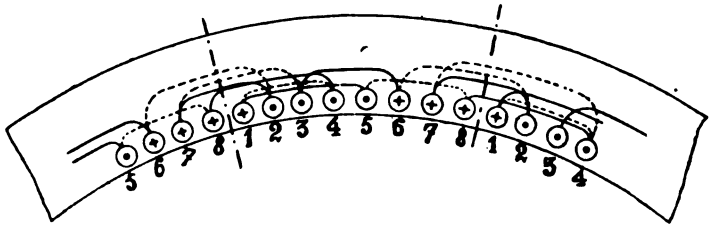


Fig. 18.

En coupe, la représentation des conducteurs sera représentée fig. 18.

La vue d'ensemble de la machine est représentée fig. 19.

The Westinghouse Electric and Manufacturing C°, de Pittsburg, construit également des moteurs asynchrones à champ tournant analogues à ceux construits par la

Digitized by Google

maison Brown Boveri, avec cette différence que les rôles que jouent les organes fixe et mobile sont renversés.

L'organe mobile de ce moteur est constitué de disques en tôle laminée. Chaque disque porte des rainures tout autour de sa périphérie ; les rainures, lors de la juxtaposition des disques, présentent des évidements longitudinaux destinés à recevoir les conducteurs isolés par du mica, et



Fig. 19.

forment l'enroulement de l'organe mobile qui se relie à des bagues en cuivre sur lesquelles frottent les balais amenant le courant d'alimentation du moteur. Comme nous venons de l'expliquer, cet organe mobile, représenté par la fig. 20, est analogue à celui du moteur Brown, à l'exception des bagues dont ce dernier est dépourvu.

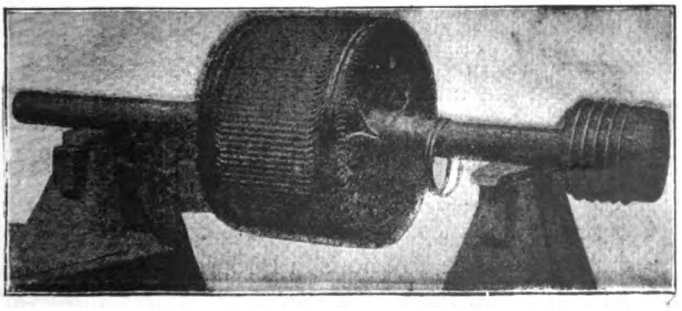


Fig. 20.

Digitized by Google

L'organe fixe du moteur en question est aussi construit par des disques en acier A portant aussi des rainures. Chacune d'elles contient un conducteur rectangulaire dont l'ensemble est encastré dans une couronne B en fer placée de part et d'autre de la machine, comme l'indique la fig. 21.

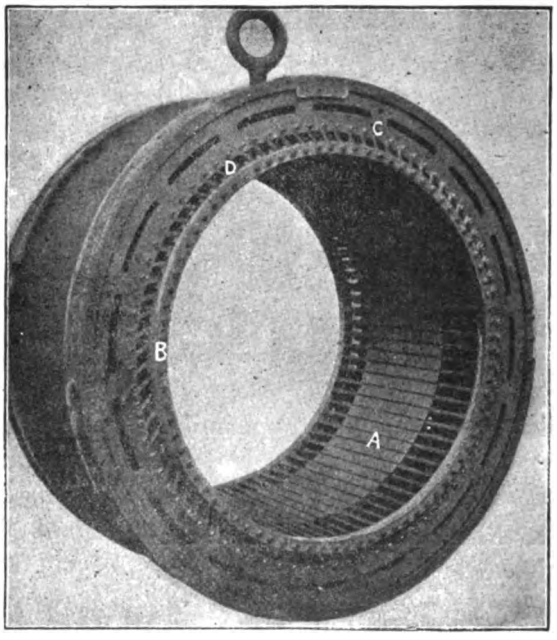


Fig. 21.

A l'extérieur de chacune de ces couronnes en fer, se trouve une autre en cuivre *c* portant des petits balais de même métal, de nombre égal à celui des conducteurs; ces couronnes en cuivre sont tournées de façon à pouvoir connecter ou déconnecter les balais aux conducteurs à l'aide d'un mécanisme que nous indiquerons en parlant du démarrage de ce moteur, ainsi que le rôle que remplissent

Digitized by Google

ces balais. La vue de travers de cet appareil est représentée dans la fig. 22.

De ce qui précède, relativement aux moteurs à champ tournant, il résulte qu'ils fonctionnent, aux phénomènes

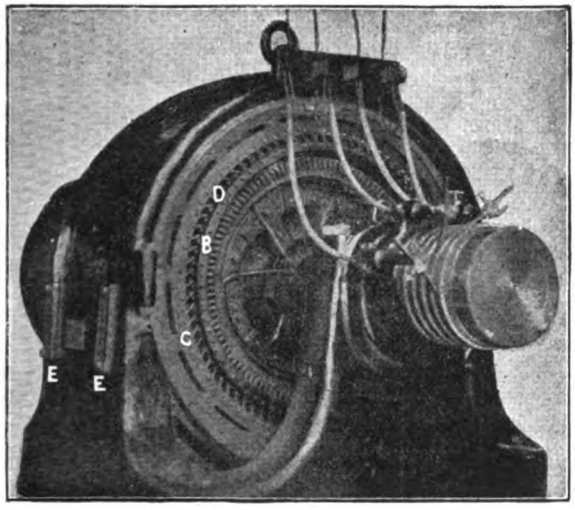


Fig. 22.

d'induction près, comme moteurs shunt à courant continu; par suite, leur mise en marche nécessite certains artifices que nous croyons utiles de signaler.

Nous savons que l'introduction d'un pareil moteur de faible puissance, ne présente aucun inconvénient au démarrage, mais, pour les moteurs à grande puissance, présente des inconvénients sérieux très nuisibles pour l'installation.

A cet effet, pour augmenter le couple au démarrage des moteurs à cage d'écureuil, on emploie le dispositif suivant: Pour éviter de prendre un courant trop fort au générateur, pouvant occasionner des perturbations dans

Digitized by Google

les réseaux, on place en dérivation sur chaque phase de la ligne un rhéostat quelconque (résistance ou self-induction). Les phénomènes de self-induction et d'induction mutuelle qui s'y développent, permettent d'obtenir le courant nécessaire au départ sans avoir besoin de recourir au générateur; une fois la vitesse normale obtenue, on supprime ce rhéostat, afin de placer le moteur directement au réseau. Cette manœuvre s'effectue facilement à l'aide du démarreur qui accompagne l'appareil.

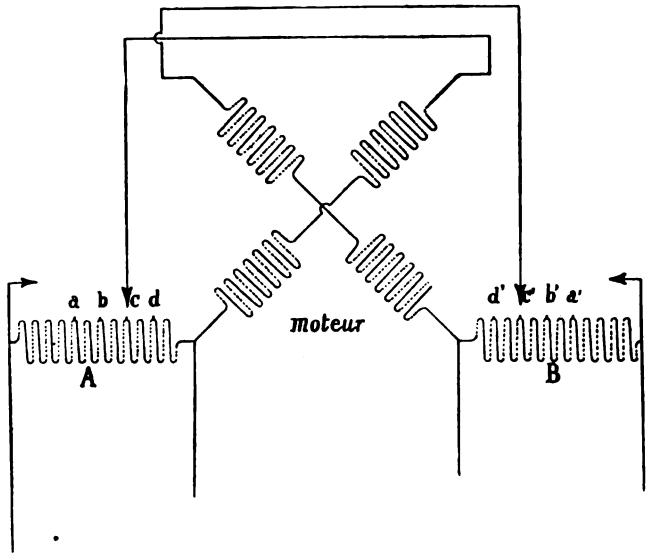


Fig. 23.

Le dispositif du démarrage peut se représenter schématiquement dans la fig. 23; il consiste en l'emploi de deux bobines de self-induction A et B ayant la même forme et pourvues d'œillets, a, b, c, d, et a', b', c', d', permettant de prendre plus ou moins de spires au démarrage, suivant les couples exigés par l'appareil à mettre en mouvement.

Digitized by Google

Le choix de l'œillet qui convient pour un démarrage suffisamment rapide et sans trop grand courant se fera pendant l'essai du moteur.

Ce dispositif présente néanmoins l'inconvénient de ne pas pouvoir varier la vitesse. Afin de remédier à ceci, on emploie des moteurs avec résistance dans l'induit; au démarrage, on introduit toute la résistance permettant d'obtenir avec le courant normal un couple facilement double du couple en charge. Une fois le moteur en marche, on règle la vitesse à volonté comme dans les moteurs shunt à courant continu. On a prétendu que ces derniers sont préférables dans ces conditions de fonctionnement parce que la variation de vitesse s'obtient en agissant sur l'excitation. Ceci, en effet, aurait été un avantage des moteurs shunt à courant continu, seulement la variation réelle de la vitesse ne pourra se faire qu'entre des limites très rapprochées à cause du collecteur et des balais. Les moteurs avec résistance dans l'induit permettent donc des variations de vitesse plus grandes que celles obtenues par l'excitation. (*)

Afin de faciliter la manœuvre du démarrage et éviter l'emploi des commutateurs et contacts glissants pour les moteurs avec résistance dans l'induit, M. Brown a imaginé un mécanisme monté sur l'arbre du moteur et qui permet de mettre l'armature en court-circuit après le démarrage.

Le démarrage du moteur Westinghouse s'obtient de la manière suivante :

Les petits balais dont nous avons parlé en décrivant l'organe fixe du moteur (voir fig. 21) sont déconnectés des conducteurs quand celui-ci doit démarrer; on ferme

(*) Boucherot. — *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens.*

Digitized by Google

le circuit à travers lequel le courant arrive au collecteur de l'organe mobile. De cette façon le moteur démarre, et, aussitôt qu'il a atteint sa vitesse normale, on connecte les petits balais avec les conducteurs. Ceci s'effectue au moyen d'un mécanisme à engrenages, fixé sur la culasse qui commande la couronne en cuivre portant les petits balais, et dont la manœuvre se fait à la main par l'intermédiaire d'une manette qu'on introduit successivement dans les ouvertures E E, comme on le voit dans la fig. 24, donnant la vue longitudinale du moteur.

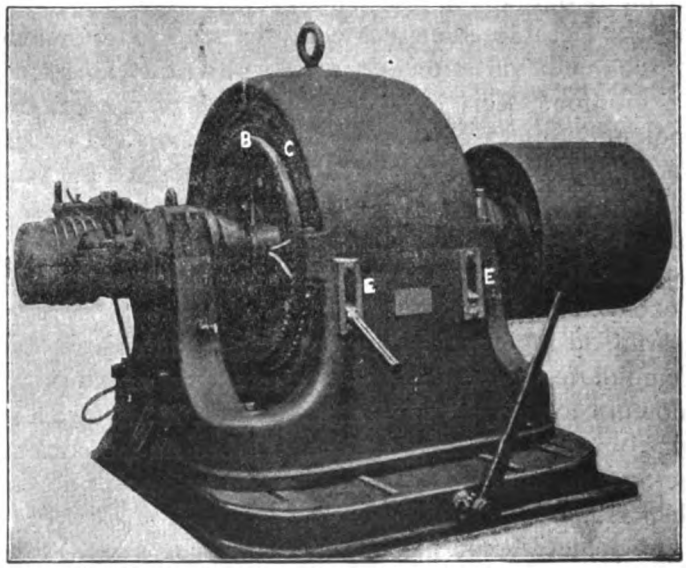


Fig. 24.

Cet artifice a pour but de limiter l'intensité du courant nécessaire au démarrage. En effet, la résistance relativement grande de la couronne en fer empêche l'induction des courants trop forts dans l'enroulement de l'organe fixe, celui-ci fonctionnant précisément comme le secon-

Digitized by Google

daire d'un transformateur quand l'organe mobile est au repos. Par conséquent si les conducteurs du premier étaient mis en court-circuit au moyen de petits balais, le courant dans le dernier serait excessif.

Les moteurs à champ tournant biphasés d'une puissance moyenne de 30 chevaux peuvent facilement être employés pour une tension de 1000 volts, tandis que ceux de 75 chevaux vont jusqu'à 2000 et ceux de 100 chevaux à 3000. Certains grands moteurs ont même été construits pour des tensions de 5000 volts.

Les quelques considérations dans lesquelles nous venons d'entrer relativement aux moteurs synchrones et asynchrones à champ tournant, montrent clairement que les derniers sont plus simples et donnent un couple au démarrage plus considérable que les premiers, mais, par contre, ils sont plus coûteux, car, pour le bon fonctionnement de ces appareils, leur construction doit être plus soignée.

M. Blondel a reconnu que la puissance des moteurs asynchrones est inférieure à celles des moteurs synchrones pour un poids donné; ceci résulte du retard de phase assez considérable entre la force électromotrice et le courant primaire. Les moteurs synchrones ont, en outre, un rendement plus élevé que les asynchrones même avec une surcharge moyenne, ce qui les fait préférer souvent au-delà d'une certaine puissance.

TRANSFORMATEURS.

Dans toute installation de distribution ou de transport d'énergie les transformateurs sont généralement employés. En dehors des fonctions qu'ils remplissent comme appareils de réglage ceux-ci sont principalement utilisés soit comme élévateurs, soit comme réducteurs de tension.

Digitized by Google

Comme élévateurs de tension, ils sont indispensables pour les installations par courants biphasés fournis par des dynamos transformées; celles-ci ne se prêtant pas pour les hautes tensions trouvent un auxiliaire précieux dans leur emploi.

A cet effet, on connecte la dynamo au moyen de quatre fils avec le circuit primaire du transformateur. Il serait imprudent d'employer trois fils de connexion, car cela reviendrait à mettre en court-circuit l'une des sections de l'armature. Les bobines secondaires parcourues par le courant de haute tension peuvent avoir une extrémité commune, en vue d'employer une canalisation par trois fils de ligne.

Dans le cas des alternateurs biphasés, l'emploi des transformateurs comme élévateurs de tension est plus avantageux que la production directe des hautes tensions.

L'emploi des génératrices à basse tension présente une grande sécurité pour le personnel chargé de la surveillance des machines et de la manœuvre du tableau.

En outre, les génératrices à basse tension ont un rendement plus élevé et coûtent moins cher.

On a cependant critiqué ce système de production indirecte des courants à haute tension parce que le prix de premier établissement, résultant de l'achat du transformateur élévateur, est augmenté et que le rendement final est diminué. Mais ces deux reproches peuvent se considérer comme compensés par suite de l'économie réalisée par l'achat des génératrices à basse tension et du rendement élevé que celles-ci fournissent.

L'emploi des transformateurs comme réducteurs de tension dans les deux cas que nous avons considérés, ainsi que pour les canalisations secondaires, est tout indiqué et les avantages qu'on peut en tirer sont faciles à conclure.

Digitized by Google

Les transformateurs employés dans les installations par courants biphasés peuvent être simples ou conjugués.

Comme type de transformateur simple, nous citerons celui de MM. C. E. L. Brown-Boveri, dont le noyau cylindrique droit N est formé d'un paquet de tôles tournées ensemble qui s'emboite dans une culasse C en forme de U à base très allongée qui complète le circuit magnétique de l'appareil. Les tôles de cette culasse sont encastrées dans leur partie inférieure dans une boite en fonte telle que le représente la fig. 25.

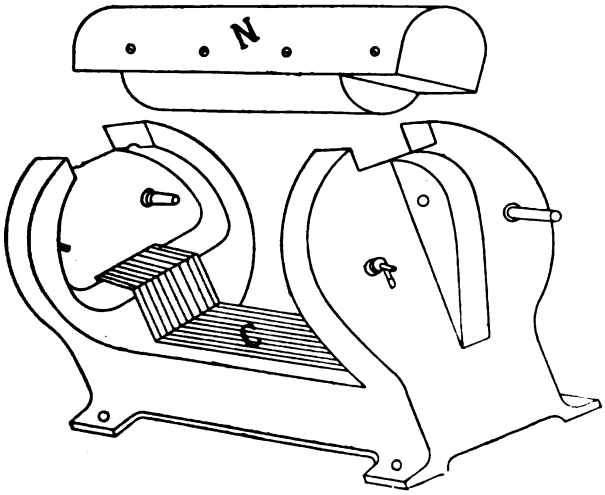


Fig. 25.

Les bobines étant enroulées séparément sont construites de façon à pouvoir s'introduire l'une dans l'autre et placées sur le noyau droit N.

L'appareil ainsi monté est placé dans la boîte, laquelle porte de part et d'autre les bornes de connexion.

Lorsque les appareils sont destinés à des endroits humides, on les plonge dans une huile isolante non oxydante.

Digitized by Google

Pour des endroits secs ils sont recouverts d'une tôle perforée pour la ventilation.

Dans une distribution par courant biphasé, on utilise deux appareils semblables convenablement reliés. Ce système offre l'avantage d'éviter la réaction des divers courants les uns sur les autres lors d'une variation brusque de l'un d'eux.

Comme type de transformateur conjugué, nous signalerons l'appareil construit par la maison Johnson et Phillips, de Londres.

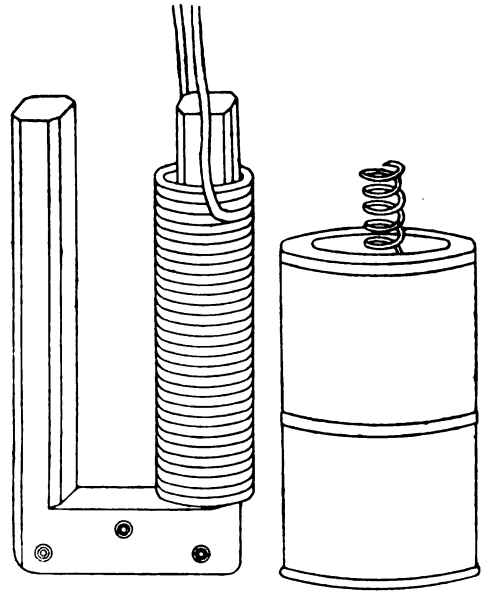


Fig. 26.

Le noyau a la forme d'un rectangle vertical allongé et se compose de tôles découpées et poinçonnées ; lors de la juxtaposition de celles-ci, on les alterne avec du papier fin.

On fait d'abord les deux noyaux et la culasse inférieure

Digitized by Google

pour le placement des bobines, puis on met les tôles de la culasse supérieure. Les deux culasses sont attachées aux noyaux à l'aide de boulons isolés. (Voir fig. 26.)

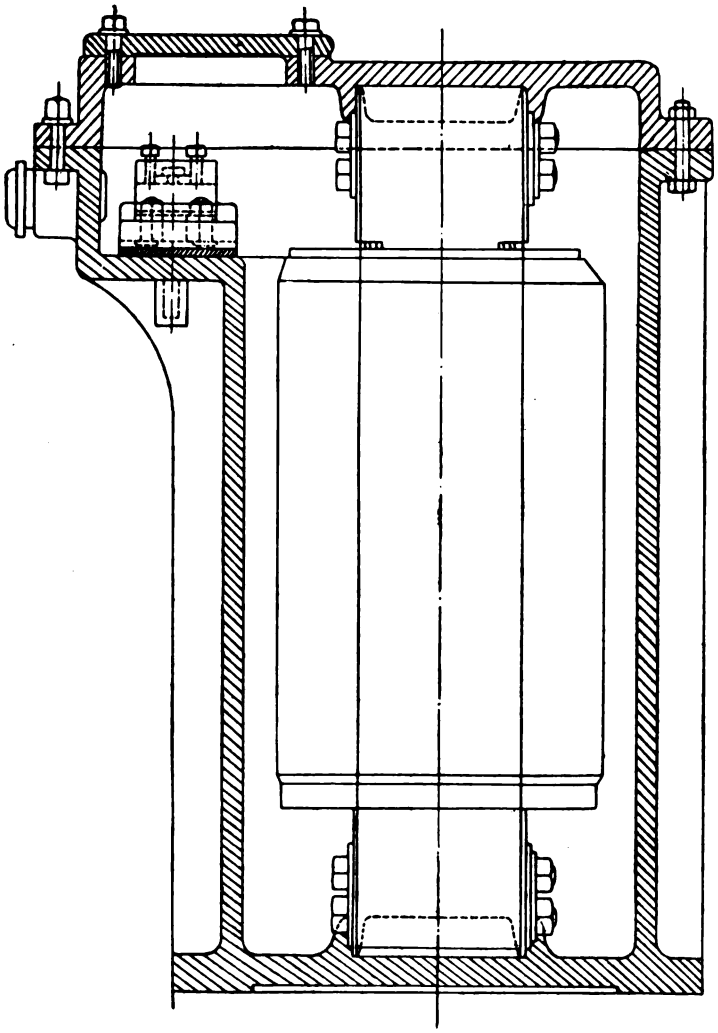


Fig. 27.

Digitized by Google

Les bobines primaire et secondaire sont montées sur des cylindres en papier, pourvus de brides à leurs extrémités inférieures pour empêcher le glissement de celles-ci.

L'enroulement des bobines se fait en ayant soin d'interposer à chaque couche une toile mince paraffinée.

Ainsi confectionnées, les bobines se manchonnent l'une l'autre et s'isolent de même par une enveloppe en ébonite.

L'appareil étant monté de cette façon, on le place dans une boite en fonte coulée, munie de nervures sur lesquelles il repose et qui empêchent le glissement de la carcasse en fer.

Les extrémités des circuits primaire et secondaire aboutissent à des bornes reposant sur des plaques épaisses en ébonite.

Les détails de construction sont représentées dans la fig 27

Ces appareils, comme tous ceux appartenant à la catégorie des conjugués, sont les plus répandus et les moins coûteux, mais ils n'offrent pas l'avantage que les appareils simples présentent.

Nous ne nous étendrons pas à décrire tous les types des transformateurs biphasés dont l'énumération seule serait longue; nous nous bornons seulement à ajouter que certains appareils de transformation servent non seulement à réduire les deux facteurs de la puissance, mais encore à transformer la nature du courant par des combinaisons spéciales de leur enroulement.

De pareilles combinaisons ont été réalisées :

1° Par M. Schückert, en transformant un courant continu en courant biphasé et réciproquement.

2° Par M. Scott, en transformant un courant triphasé en courant biphasé ou réciproquement.

D'après les considérations que nous venons d'exposer sommairement sur ces appareils, on peut aisément

Digitized by Google

conclure que le rôle que jouent ceux-ci est de la plus haute importance.

A l'exception des transformateurs rotatifs, qui présentent certains inconvénients résultant de l'isolement de l'organe mobile ainsi que de l'entretien et de la surveillance qu'ils exigent, les transformateurs sont destinés à rendre de précieux services à l'industrie où l'électricité est appelée à résoudre les difficultés que présentent les autres systèmes, aux distributions et transports d'énergie à grande distance.

Tableaux de distribution. — Dans ce qui précède, nous avons résumé le mode et la description des appareils de production et d'utilisation de l'énergie électrique par courants biphasés. Nous allons maintenant indiquer schématiquement les connections et les différents appareils entrant dans la composition des tableaux de distribution, tels qu'on les rencontre généralement dans l'industrie.

Une station située en A produit l'énergie électrique destinée à être transportée dans une sous-station d'utilisation B.

La fig. 28 représente le tableau de distribution de la station centrale A, dont la canalisation est supposée à quatre fils. Sur chacun des circuits des alternateurs est placé un ampèremètre. Un seul voltmètre v_1 est branché sur un des circuits de la canalisation. Les inducteurs des alternateurs sont excités en dérivation sur une canalisation venant des dynamos excitatrices Les rhéostats R_1, R_2, R_3 servent à règler l'excitation jusqu'à ce que la tension alternative de chaque machine, qui peut être indiquée par V_2, soit identique à celle de la canalisation. Des parafoudres placés à la sortie du tableau protègent ce dernier des décharges atmosphériques.

A la sous-station B, la simplicité est encore plus grande.

Digitized by Google

Nous avons supposé un transformateur conjugué (T) réduisant la haute tension en une tension moindre de façon à pouvoir être utilisée sans danger par un gros

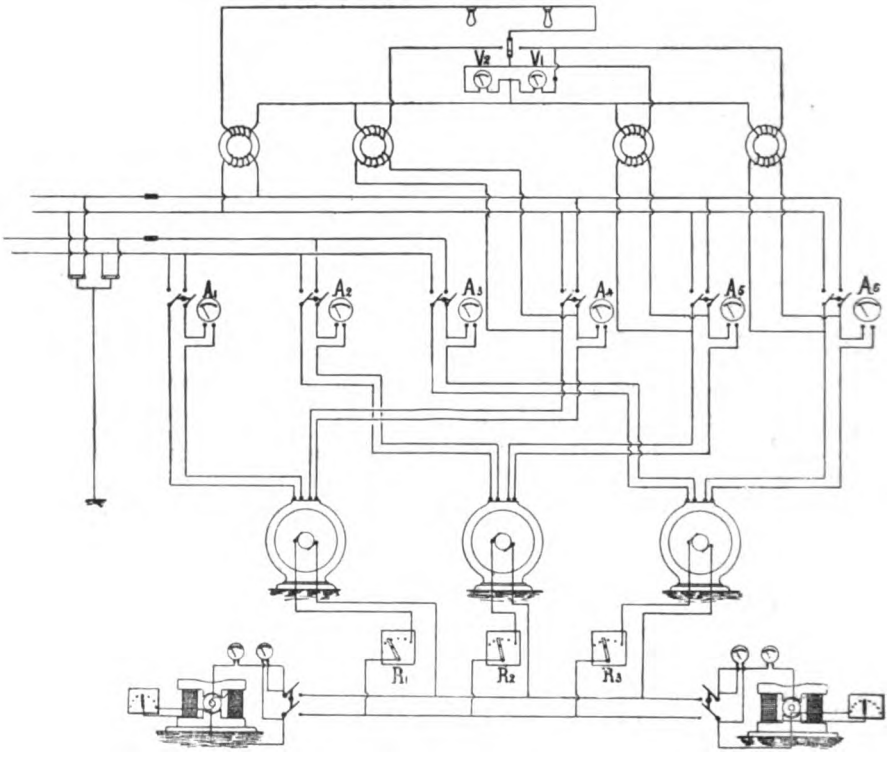


Fig. 28.

moteur M. Une dérivation alimente une canalisation à trois fils pour l'alimentation de petits moteurs M_2. (Voir fig. 29.) Un réseau d'éclairage est pris sur la canalisation principale, la tension est réduite à l'aide de deux transformateurs simples T_1 et T_2.

Dans le cas, au contraire, d'une distribution d'énergie, différents appareils de réglage sont nécessaires.

Digitized by Google

La connaissance de la tension au point d'utilisation est une des questions d'importance primordiale. L'usine centrale devra donc être toujours pourvue de voltmètres indiquant la différence de potentiel aux bornes des appareils récepteurs branchés sur le réseau.

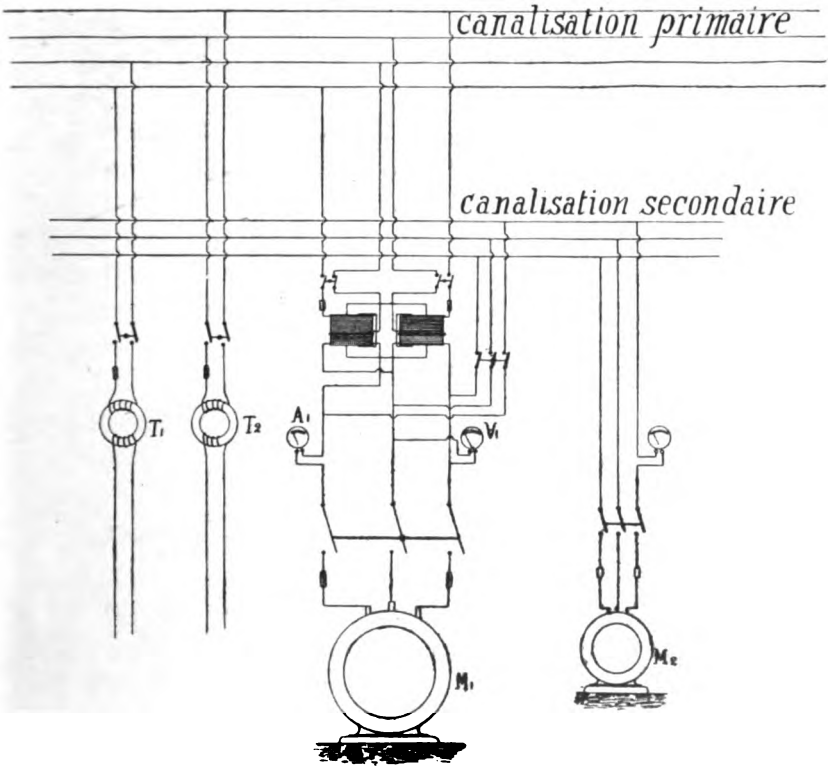


Fig. 29.

Les grandes distances, auxquelles on est souvent conduit dans les canalisations à haut voltage, conviennent peu à l'emploi du fil pilote ; aussi préfère-t-on recourir aux propriétés d'induction exercées par les courants alternatifs et employer des égalisateurs de tension.

Digitized by Google

Seulement si les deux ponts sont inégalement chargés (ce qui se présente dans les circuits d'éclairage), il en résultera des différences de tension dans les deux circuits. Pour remédier à cet inconvénient, on disposera dans les circuits secondaires des appareils dits équilibreurs de tension.

Si du tableau de distribution partent plusieurs feeders, le réglage pourrait se faire à l'aide de rhéostats, comme dans les installations par courant continu, ou par l'emploi de bobines de réaction.

M. Swinburne préconise la disposition suivante :

Il groupe en parallèle les alternateurs à basse tension et place un transformateur sur chaque artère. A l'aide d'un commutateur à plusieurs directions, on peut varier le nombre des spires primaires actives et par suite la force électromotrice exigée en tête de l'artère.

FRÉQUENCE

Le choix de la fréquence a une certaine importance dans un projet d'installation. Considérons séparément chaque partie d'une distribution.

1° *Alternateurs.* — Leur prix diminue en même temps que la fréquence.

2° *Transformateurs.* — Le prix de revient diminue avec la fréquence ; seulement la surface de refroidissement est plus grande pour les petits appareils que pour les grands ; il en résulte donc qu'on peut adopter une fréquence plus grande pour les petits transformateurs que pour ceux de grande puissance.

3° *Moteurs.* — Les basses fréquences sont préférables ; elles réduisent la vitesse et facilitent le démarrage ; ainsi pour le transport de force du Niagara, M. Forbes a adopté une fréquence de 16,67, laquelle, à l'exécution des machines, a été rapportée par les constructeurs à 25.

Digitized by Google

4° *Éclairage.* — Les hautes fréquences conviennent mieux aux lampes ; on est allé jusqu'à des fréquences de 130 à 140.

5° *Transport de force et éclairage combinés.* — La fréquence la plus avantageuse est voisine de 50.

Elle n'est pas excessive pour les moteurs, et permet l'alimentation des lampes dans de bonnes conditions.

6° *Canalisation.* — Les basses fréquences sont préférables; elles diminuent les effets d'impédance, de capacité, ainsi que l'effet Thomson.

CANALISATIONS.

Dans l'établissement des canalisations par courants biphasés, deux cas bien distincts peuvent se présenter :

1° A quatre fils de ligne.

2° A trois fils de ligne.

Le premier cas ne présente rien de particulier en lui-même; les deux circuits étant indépendants l'un de l'autre, se calculeront exactement comme les lignes ordinaires à courant monophasé.

Nous rappellerons simplement les formules dont on se sert à cet effet, et nous en donnerons seulement les principales.

Si S, l et ρ désignent la section, la longueur et la résistance spécifique de l'un des conducteurs dans le cas d'une canalisation à quatre fils de ligne, on a pour la résistance d'un des circuits :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{K}{100} \times \frac{E}{I}$$

d'où

$$(1) \qquad S = \frac{\rho l I}{\frac{K}{100} E}.$$

Digitized by Google

Si, au contraire, les deux fils de retour sont réunis en un seul, nous aurons la disposition suivante :

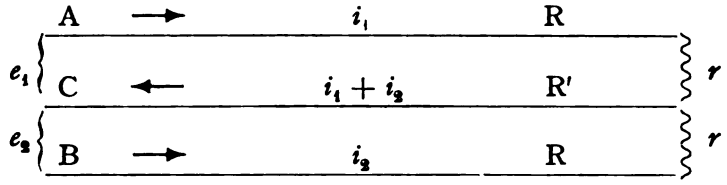


Fig. 30

i_1 et i_2 étant les courants d'aller, et R la résistance de ces conducteurs, R' celle de celui de retour ; r étant des résistances sans self-induction qui ferment les circuits.

Les différences de potentiel respectives entre les points AC et CB nous seront données par :

$$e_1 = (R + r)\, i_1 + R'\,(i_1 + i_2) = E\sqrt{2}\sin at$$
$$e_2 = (R + r)\, i_2 + R'\,(i_1 + i_2) = -E\sqrt{2}\cos at.$$

De ces deux équations, en posant :

$$\frac{R + r + 2R'}{R + r} = \operatorname{tang} 2\pi\varphi$$

on tire aisément :

$$(2)\quad i_1 = \frac{E\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2R'}{R + r}\right)^2}}{R + r + 2R'} \sin\left(at - \frac{\pi}{4} + 2\pi\varphi\right)$$

$$(3)\quad i_2 = \frac{E\sqrt{1 + \left(\frac{R + r + 2R'}{R + r}\right)^2}}{R + r + 2R'} \sin\left(at - \frac{\pi}{4} - 2\pi\varphi\right)$$

En pratique, on néglige le décalage des courants i_1 et i_2 par rapport aux tensions e_1 et e_2.

Digitized by Google

Nous admettrons que l'on a sensiblement :

$$\sqrt{1+\left(\frac{R+r+2R'}{R+r}\right)^2}=\sqrt{2}$$

alors i_1 et i_2 deviennent :

$$(4)\qquad I=\frac{E}{R+r+2R'}.$$

On voit aisément que la perte due au courant i_1 est donnée par :

$$W=\frac{1}{T}\int_0^T[R\,i_1\,dt+R'(i_1+i_2)\,i_1\,dt]$$

d'où l'on tire : $W=(R+R')\,I^2$.

Si nous désignons par

l = la longueur de chaque fil,
S = la section des fils d'aller,
S' = la section du fil de retour,
V = le volume total du métal,

la perte totale de puissance dans la ligne sera

$$(6)\qquad W=2(R+R')\,I^2=2\,I^2\rho\,l\left(\frac{I}{S}+\frac{I}{\frac{V}{l}-2S}\right).$$

Car le volume total du métal est donné par $2\,S\,l+S'\,l$ et la section du fil de retour par : $\frac{V}{l}-2\,S$.

L'expression (6) sera minimum pour :

$$-\frac{I}{S^2}+\frac{2}{\left(\frac{V}{l}-2s\right)^2}=0$$

Digitized by Google

ce qui donne pour :

$$(7) \quad S = \frac{V}{l}\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 0{,}295\,\frac{V}{l}$$

et

$$(8) \quad S' = \frac{V}{l}(\sqrt{2} - 1) = 0{,}41\,\frac{V}{l}.$$

La perte en watts sera donc, tout calcul fait :

$$(9) \quad W = 11{,}66\,\rho\,\frac{l^2}{V}\,I^2. \ (*)$$

La discussion de ces deux systèmes de distribution, relativement à la répartition du métal, peut se résumer dans le tableau suivant :

(Nous représentons par 1 le poids du cuivre pour une canalisation identique à courant monophasé).

	Cas de deux fils de retour.	Cas d'un fil de retour.
1° Pour une même tension aux génératrices	1	0,73
2° Pour une même valeur de la tension entre les fils extrêmes.	1	1,46

Supposons, pour fixer les idées, que nous ayons à transporter une puissance de 100 chevaux-vapeur à une distance de 5 kilomètres, sous une tension de 2000 volts. On consent à une perte en ligne de 10 %.

(*) Voir Rodet et Busquet.

Digitized by Google

Nous déterminerons aisément par la formule (1) la section pour une canalisation à quatre fils.

Nous poserons : $\rho = 16{,}6$, d'où :

$$S = \frac{16{,}6 \times 10 \times 18{,}4}{200} = 15{,}3 \text{ millim}^2$$

d'où un diamètre de 4,4 millim.

Pour une canalisation à trois fils de ligne, nous tirons de l'équation (9) le volume du cuivre en décim^3.

Soit :

$$V = \frac{11{,}66 \times 16{,}6 \times 5^2 \times 18{,}4^2}{7360} = 222 \text{ décim}^3$$

et par la formule (7) la section du fil d'aller

$$S' = 0{,}3\,\frac{222}{5} = 13{,}3 \text{ millim}^2$$

d'où un diamètre de 4,1 millim.

et par la formule (8), la section du fil de retour

$$S'' = 0{,}4\,\frac{222}{5} = 17{,}8 \text{ millim}^2.$$

Ce qui nous donne un diamètre de 4,8 millim.

Cette manière d'opérer, quoique très simple, offre l'inconvénient d'exiger des calculs, ce qui est souvent une perte de temps dans l'élaboration d'un avant-projet de distribution.

Par le procédé suivant, qui est moins rigoureux, mais présente cependant une exactitude suffisante, surtout dans un calcul approximatif, on peut arriver à déterminer directement la section des conducteurs. Il consiste dans l'emploi des trois tableaux suivants :

Dans un 1er tableau, se trouvent, en ampères, les différents courants requis par cheval-vapeur pour différentes tensions.

Digitized by Google

TABLEAU I.

Courant requis par cheval-vapeur pour différentes tensions.

Volts.	Ampères.
110	3,350
220	1,675
440	0,837
1000	0,368
2000	0,184
3000	0,123
5000	0,073

Dans un tableau II se trouvent les volts perdus par kilomètre pour différentes densités de courant.

TABLEAU II.

Volts perdus par kilomètre pour différentes densités de courant.

AMPÈRES PAR CENTIM² DE SECTION.	PERTE DE TENSION EN VOLTS PAR KILOMÈTRE.	AMPÈRES PAR CENTIM DE SECTION.	PERTE DE TENSION EN VOLTS PAR KILOMÈTRE.
1000	167	180	30
900	150	170	28,5
800	133	160	27
700	117	150	25
600	100	140	23,5
500	83	130	22
400	67	120	20
350	58	110	18,5
300	50	100	17
280	47	90	15
260	43	80	13,5
240	40	70	12
220	37	60	10
200	33	50	8,5
190	31,5		

Digitized by Google

Dans le tableau III (p 122 et 123) se trouve la section des conducteurs requise pour les différents courants.

Pour la résolution du problème précédent, nous procéderons comme suit :

1° Pour une canalisation à quatre fils de ligne.

Le tableau I indique qu'aux 2 000 volts exigés, correspond 0,184 ampère par cheval-vapeur. Ce qui fait un courant de 18,4 ampères pour les 100 chevaux.

La perte étant de 10 %, nous perdrons 200 volts dans la ligne ; d'où 20 volts par kilomètre.

Le tableau II montre que, pour une telle perte de tension, nous devons avoir une densité de courant de 120 ampères par cm^2.

Enfin, le tableau III nous montre qu'à cette densité, 18,4 ampères seront portés par un fil ayant un diamètre voisin de 4,5 mm.

2° Pour une canalisation à trois fils de ligne.

Dans ce cas, on opérerait comme suit :

1° Pour le fil d'aller.

Le tableau I indique encore qu'aux 2 000 volts correspond 0,184 ampère par cheval-vapeur, soit 18,4 ampères pour les 100 chevaux.

La perte étant de 10 %, nous obtenons une perte totale pour toute la ligne de 200 volts.

Nous obtiendrons très sensiblement la perte due au fil d'aller, en multipliant 200 par 0,575 (*), ce qui nous donne 115 volts, soit 23 volts par kilomètre.

Le tableau II nous indique qu'elle correspond à une densité de 140 ampères par cm^2.

(*) Nous avons déterminé ces deux constantes en prenant les moyennes pour un certain nombre de problèmes traités théoriquement.

Digitized by Google

TABL

Section des conducteurs re

DIAMÈTRE en millimètres.	SECTION en millim².	RÉSISTANCE en ohms par kilomètre.	POIDS EN KILOG. par kilom.	AMPÈRES QUE LES CONDUCTEURS SUPPORTENT											
				1000	900	800	700	600	500	400	350	300	280	260	24
				Ampères pa											
10	78,54	0,203	699,00	785	706	628	550	472	393	314	275	236	220	204	189
9	63,62	0,251	566,19	636	573	509	445	382	318	254	223	191	178	165	153
8	50,27	0,318	447,36	503	452	402	352	302	251	201	176	151	141	131	121
7	38,48	0,415	342,51	385	346	308	270	231	192	154	135	115	108	100	92,
6,5	33,18	0,481	295,33	332	298	266	232	199	166	133	116	99,5	92,8	86,2	79,
6	28,27	0,565	251,64	283	254	226	198	170	141	113	99	84,8	79,2	73,5	67,
5,5	23,76	0,673	211,45	238	214	190	166	142	119	95	83,1	71,2	66,5	61,7	57
5	19,64	0,814	174,75	196	177	157	137	118	98,2	78,5	68,8	59	55	51	47,
4,5	15,9	1,005	141,55	159	143	127	111	95,5	79,5	63,5	55,6	47,7	44,5	41,3	38,
4	12,57	1,271	111,84	126	113	100,5	88	75,5	62,8	50,3	44	37,7	35,2	32,6	30,
3,5	9,62	1,660	85,628	96,2	86,5	77	67,3	57,7	48,1	38,4	33,6	28,8	26,9	25	23,
3	7,07	2,255	62,91	70,7	63,6	56,5	49,5	42,5	35,4	28,3	24,8	21,2	19,8	18,4	17
2,5	4,9	3,255	43,688	49	44,1	39,2	34,3	29,4	24,5	19,6	17,2	14,7	13,7	12,7	11,
2	3,14	5,085	27,96	31,4	28,3	25,2	22	18,9	15,7	12,6	11	9,45	8,8	8,2	7,
1,5	1,77	9,040	15,728	17,7	15,8	14,1	12,4	10,6	8,9	7,1	6,2	5,3	4,9	4,6	4,
1	0,79	20,342	6,99	7,9	7,1	6,3	5,5	4,7	3,9	3,1	2,8	2,4	2,2	2,1	1,

Digitized by Google

J III.

pour différents courants.

A UN COURANT DE DENSITÉ DE

20	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50
ntimètre carré.																
3	157	149	141	134	126	118	110	102	94,5	86,5	78,5	70,6	62,8	55	47,2	39,3
o	127	121	114	108	102	95,5	89	82,6	76,4	70	63,6	57,3	50,9	44,5	38,2	31,8
o	100	95,5	90,5	85,3	80,5	75,5	70,4	65,4	60,4	55,3	50,3	45,2	40,2	35,2	30,2	25,1
4,7	77	73,2	69,3	65,5	61,7	57,8	54	50	46,2	42,4	38,5	34,6	30,8	27	23,1	19,2
3	66,3	63	59,7	56,4	53	49,7	46,4	43,1	39,8	36	33,2	29,8	26,6	23,2	19,9	16,6
2,2	56,5	53,7	50,9	48,1	45,2	42,4	39,6	36,8	34	31,1	28,3	25,4	22,6	19,8	17	14,1
2,2	47,5	45,1	42,7	40,4	38	35,6	33,2	30,9	28,5	26,1	23,8	21,4	19	16,6	14,2	11,9
3,2	39,3	37,3	35,4	33,4	31,4	29,4	27,5	25,5	23,6	21,6	19,6	17,7	15,7	13,7	11,8	9,8
5	31,8	30,2	28,6	27	25,4	23,8	22,2	20,7	19,1	17,5	15,9	14,3	12,7	11,1	9,6	7,9
7,6	25,1	23,9	22,6	21,4	20,1	18,8	17,6	16,3	15,1	13,8	12,6	11,3	10	8,8	7,5	6,3
1,2	19,2	18,3	17,3	16,4	15,4	14,4	13,5	12,5	11,5	10,6	9,6	8,7	7,7	6,7	5,8	4,8
5,5	14,1	13,4	12,7	12	11,3	10,6	9,9	9,2	8,5	7,8	7,07	6,4	5,7	4,9	4,3	3,5
0,8	9,8	9,3	8,8	8,3	7,8	7,4	6,9	6,4	5,9	5,4	4,9	4,4	3,9	3,4	2,9	2,5
5,9	6,3	6	5,7	5,3	5	4,7	4,4	4,1	3,8	3,5	3,2	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6
1,9	3,5	3,3	3,2	3	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1	0,8
1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1	0,9	0,86	0,8	0,7	0,6	0,55	0,5	0,4

Digitized by Google

Le tableau III nous donne une section un peu supérieur à 4 mm du diamètre.

2° Pour le fil de retour.

Il se calculerait exactement de la même manière, seulement la chute de la tension totale doit être multipliée par 0,425 (*).

On trouverait un diamètre un peu inférieur à 5 mm.

Afin d'éviter l'ennui de devoir faire les multiplications par 0,575 et 0,425, on peut faire usage du diagramme représenté dans la fig. 31.

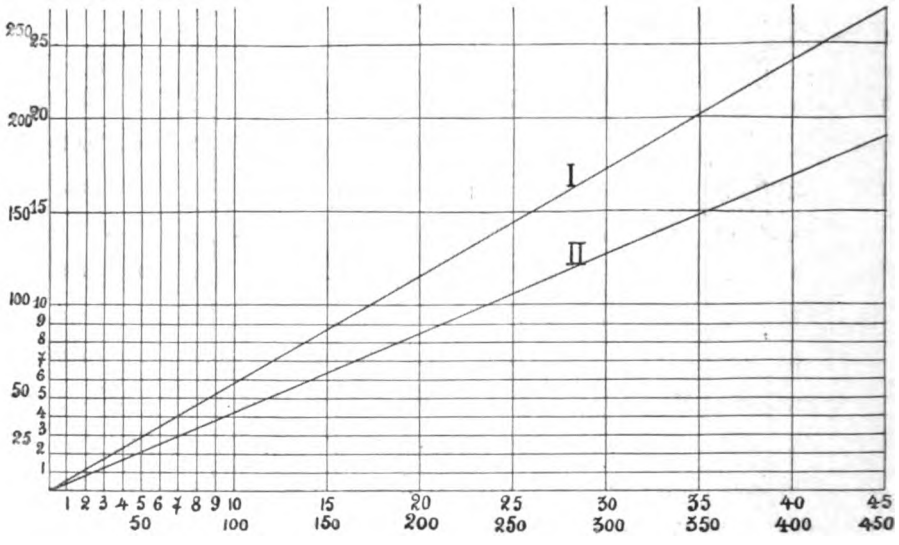


Fig. 31.

Pour une chute de tension totale, déterminée, qui se lira en abscisse, l'ordonnée correspondante de la droite I

(*) Nous avons déterminé ces deux constantes en prenant les moyennes pour un certain nombre de problèmes traités théoriquement.

Digitized by Google

donnera la chute due au fil d'aller et celle de la droite II, la chute due au fil de retour.

On se rapprocherait considérablement des résultats trouvés par le calcul, en procédant par interpolations ; seulement, ce moyen enlèverait à ce procédé les seuls avantages qu'il présente : la simplicité et la rapidité.

Nous y avons remédié en substituant au tableau III les fig. 33 et 34 dans lesquelles se trouvent tracées toutes les courbes de densité.

Ces dernières ayant été déterminées, comme précédemment au tableau II, nous lisons les ampères en ordonnées et le diamètre correspondant en abscisses.

Pour la canalisation à quatre fils, nous obtiendrions un diamètre de 4,4 mm.

Pour la canalisation à trois fils, pour le fil d'aller 4,1 mm. et pour le fil de retour 4,83 mm.

Le problème tel qu'il vient d'être traité ne se rencontre que lorsque la chute de tension est imposée ou ne peut varier que dans des limites restreintes. Mais, dans le cas où l'énergie à transmettre est seule déterminée, le problème consiste dans la recherche de la section la plus avantageuse au point de vue du coût d'exploitation.

Cette recherche se fait aisément par la règle de Lord Kelvin, laquelle suppose un conducteur ayant la forme d'un solide d'égale résistance et dans lequel la densité du courant admise est constante depuis l'origine jusqu'à l'extrémité de celui-ci.

A cet effet, considérons un conducteur ayant la forme ci-dessous :



Fig. 32.

et appelons :

Digitized by Google

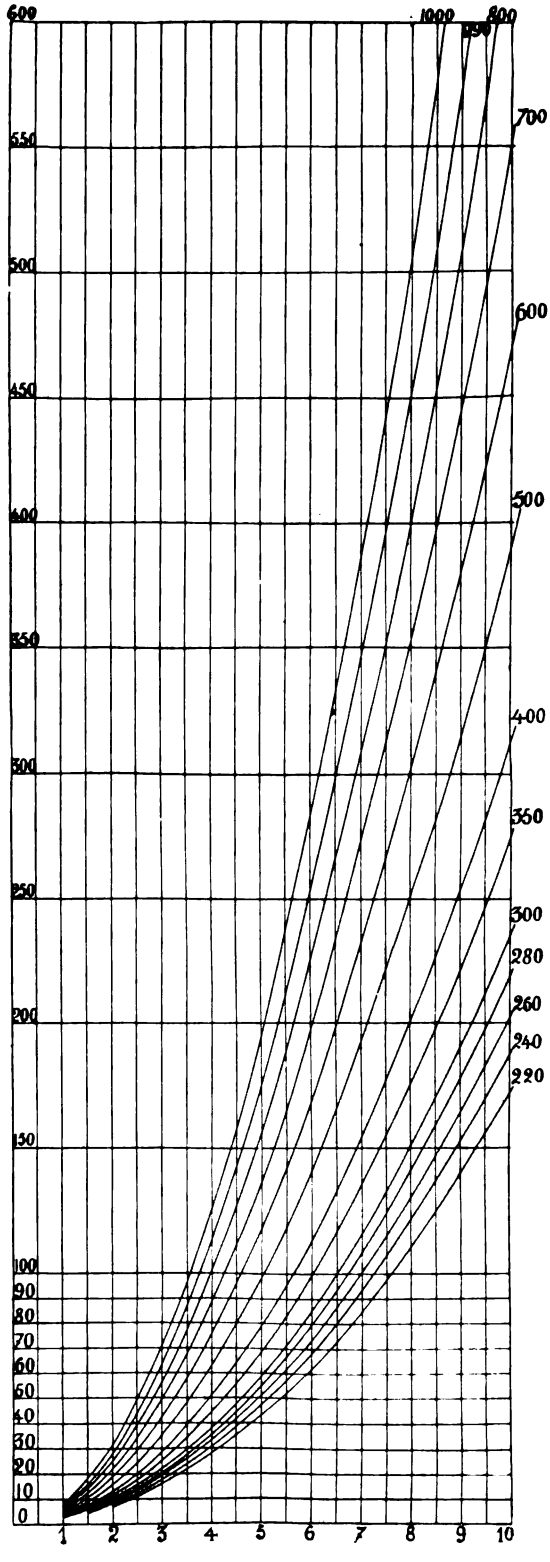


Fig. 33.

Digitized by Google

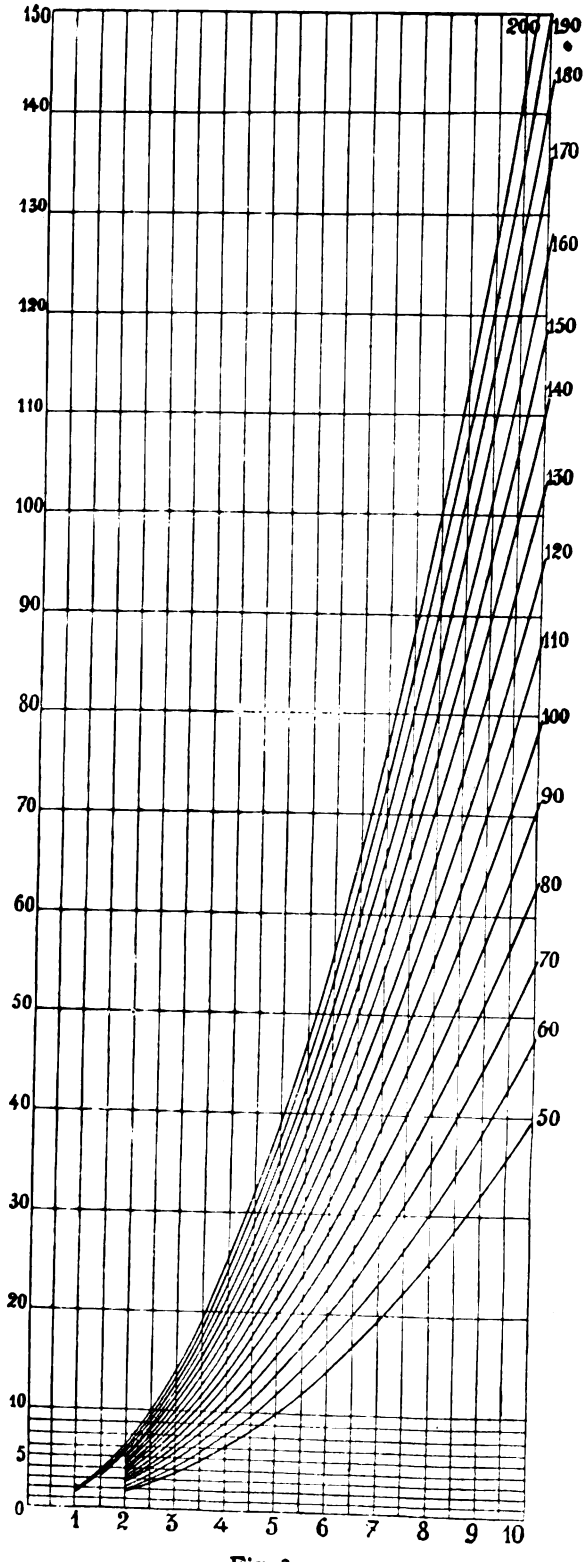


Fig. 34.

Digitized by Google

S : La section initiale du conducteur en cm².

L : La longueur totale simple de celui-ci.

I : Le courant initial.

s : La section en cm² de l'un des tronçons intermédiaires.

l : Sa longueur simple.

i : Le courant qui circule dans celui-ci.

m : Le poids d'une barre de cuivre pur ayant 1 cm² de section et une longueur de 1 mètre, ce qui équivaut à 0,89 kilog.

r : La résistance de cette barre = 0,00016 ohms.

v : Le prix en francs du kilog. de cuivre.

a : Le taux d'intérêt et d'amortissement de la ligne rapporté au prix du cuivre.

p : Le prix de location annuel du cheval-vapeur.

Q : La somme de l'intérêt et de l'amortissement de la ligne en ajoutant la valeur de l'énergie perdue dans le conducteur.

Ceci étant, la valeur de l'intérêt et de l'amortissement pour le tronçon considéré, sera :

$$2\,l\,v\,m\,a\,s. \qquad (I)$$

Or, en désignant par η le rapport du courant *i* au courant I nous avons :

$$\eta = \frac{i}{I} = \frac{s}{S}.$$

d'où nous tirons :

$$s = \eta\,S$$

et en remplaçant cette valeur dans l'équation (I) nous aurons :

$$2\,l\,v\,m\,a\,\eta\,S$$

Digitized by Google

et comme valeur de l'intérêt et de l'amortissement de la ligne:

$$\psi_1 = 2\,\Sigma\,(l\,\eta)\,v\,m\,a\,S \qquad (II)$$

La perte en charge du tronçon considéré sera exprimée par:

$$\frac{2\,l\,r\,i}{736\,s} \text{ chevaux-vapeur}$$

ou

$$\frac{2\,l\,r\,i}{736\,s}\,p \text{ en francs} \qquad (III)$$

mais par hypothèse nous avions

$$\eta = \frac{i}{I} = \frac{s}{S}$$

ou plutôt

$$\eta = \frac{i}{s} = \frac{I}{S}$$

donc:

$$\frac{i^2}{s} = \frac{I^2\,\eta}{S}$$

ce qui nous donne en remplaçant dans (III):

$$\frac{2\,l\,\eta\,r\,I^2}{736\,S}\,p \qquad (IV)$$

donc, pour toute la ligne nous aurons:

$$\psi_2 = 2\,\Sigma\,(l\,\eta)\,\frac{r\,I^2}{736\,S}\,p. \qquad (V)$$

La formule de Lord Kelvin étant la somme des équations (II) et (V), nous avons:

$$Q = \psi_1 + \psi_2 = 2\,\Sigma\,(l\,\eta)\left\{ v\,m\,a\,S + \frac{r\,I^2}{736\,S}\,p \right\}$$

Digitized by Google

dont le minimum sera pour :

$$v\,m\,a\,S - \frac{r\,I^2}{736\,S}\,p = o$$

ce qui conduit à :

$$v\,m\,a\,S = \frac{r\,I^2}{736\,S}\,p \qquad \text{(VI)}$$

d'où nous tirons :

$$S = I\sqrt{\frac{r\,p}{736\,v\,m\,a}} \qquad \text{(VII)}$$

expression qui nous donne la section la plus avantageuse à adopter pour une canalisation à 4 fils de ligne. Pour une canalisation à 3 fils, la théorie développée précédemment montrerait que la section du fil d'aller

$$S_1 = \frac{I}{1,14}\,S$$

et que celle du fil de retour

$$S_2 = 1,33\,S_1.$$

Afin d'éviter l'ennui de devoir faire les calculs exigés par l'emploi de cette règle, nous appliquerons la théorie développée par M. J. Bois et sur laquelle il s'est basé pour la construction de ses abaques logarithmiques destinés aux canalisations à courant continu. Par ce procédé, on arrive, dit-il, avec beaucoup de rapidité au résultat cherché, et avec une exactitude plus que suffisante dans la pratique.

La fig. 35 donne directement les valeurs de la section la plus avantageuse pour les canalisations biphasées à 3 et

Digitized by Google

4 fils de ligne. Elle renferme trois abaques: se déduisant de l'équation (VI).

1° L'abaque des taux: déduite de l'équation

$$\mu_1 = v\, m\, a. \qquad (\alpha)$$

2° L'abaque des intensités: déduite de l'équation

$$\mu_2 = \frac{r\, I^2}{736}\, p. \qquad (\beta)$$

3° L'abaque des sections: déduite des deux précédentes.

1° *Abaque des taux.* — En prenant les logarithmes des deux membres de l'équation (α) nous trouvons:

$$\log.\ \mu_1 = \log.\ a + \log.\ v + \log.\ m.$$

Pour un m fixé à priori, cette équation représente une droite de 45° dont les coordonnées à l'origine sont données par $\log.\ v + \log.\ m$.

En portant les valeurs de $\log.\ a$ en abscisses, leurs ordonnées seront proportionnelles à:

$$\log.\ \mu_1 = \log.\ (a\, m\, v).$$

2° *Abaque des intensités.* — En prenant les logarithmes de l'équation (β), nous avons:

$$\log.\ \mu_2 = 2 \log.\ I + \log.\ p + \log.\ \frac{r}{736}$$

équation d'une droite faisant avec l'axe des abscisses un angle de 63° 26' et ayant pour ordonnée à l'origine

$$\log.\ p + \log.\ \frac{r}{736}$$

on aura donc autant des droites que l'on attribue de valeurs à p.

Digitized by Google

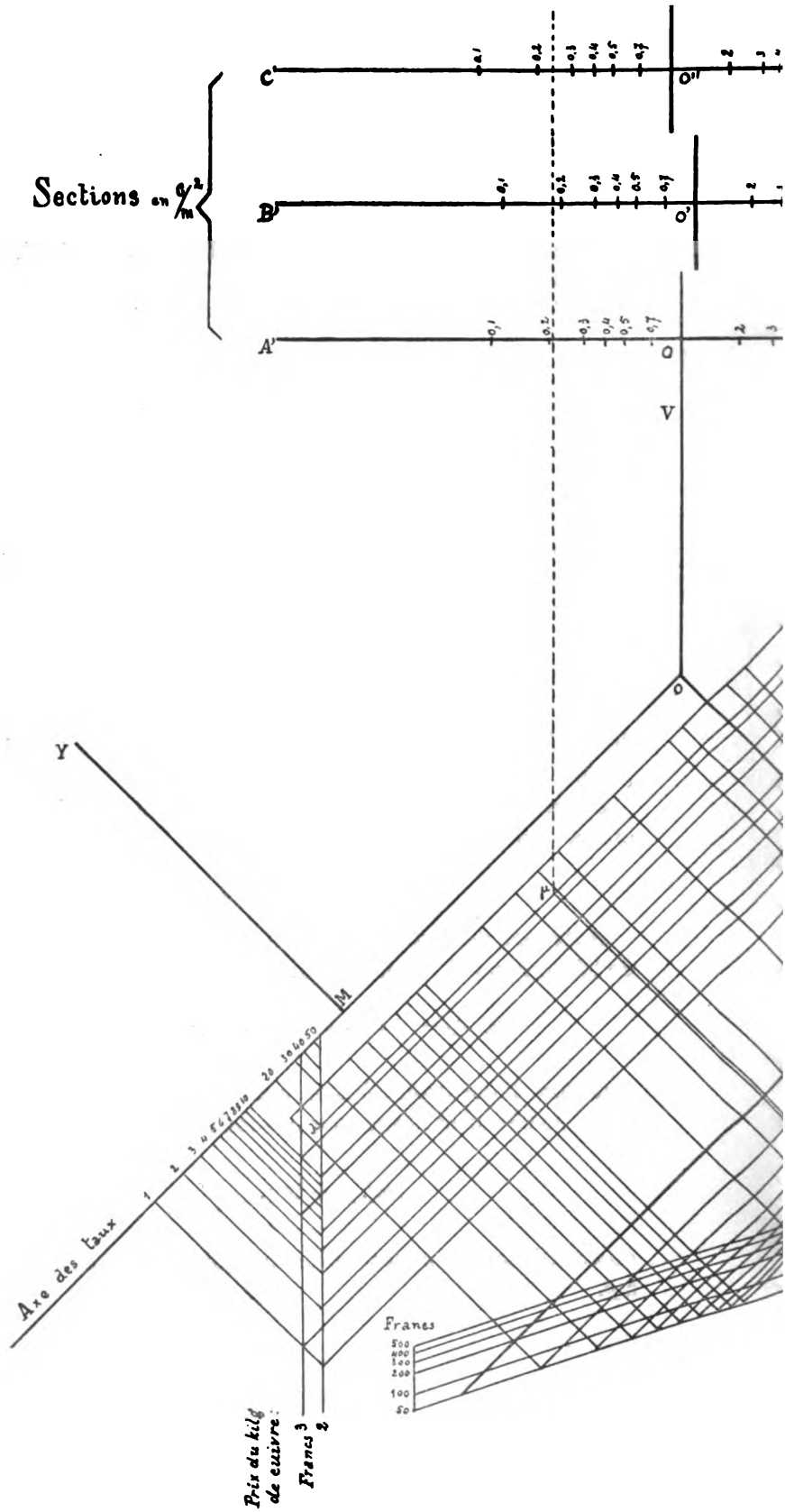
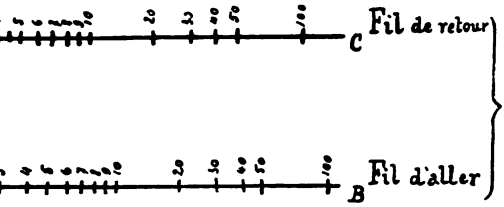
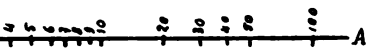
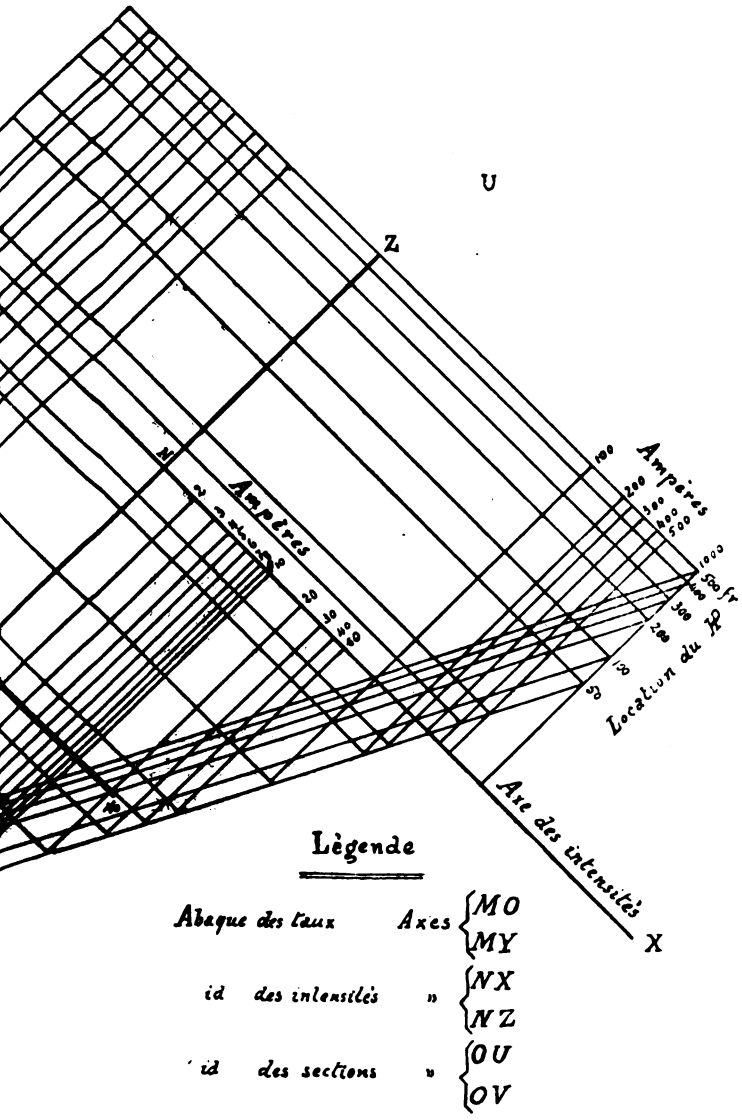


Fig.

Digitized by Google







Digitized by Google

Les log. I sont portés en abscisses dont les ordonnées sont proportionnelles à :

$$\log. \mu_2 = \log. \frac{r\, I^2}{736}\, p.$$

3° *Abaque des sections.* — L'équation VI peut s'écrire

$$\mu_1\, s = \frac{\mu_2}{s}.$$

En posant le 1er membre égal à z_1 et le second à z_2 nous trouvons en prenant les logarithmes

$$\log. z_1 = \log. S + \log. \mu_1 \qquad (\delta)$$
$$\log. z_2 = -\log. S + \log. \mu_2. \qquad (\varepsilon)$$

L'équation (δ) représente une droite de 45° dont l'ordonnée à l'origine est log. μ_1.

L'équation (ε) représente une droite à 135° rapportée aux mêmes axes et ayant pour ordonnée à l'origine log. μ_2 ; l'abscisse du point de rencontre de ces deux droites donnera la valeur de la section cherchée.

Dans la fig. 35, pages 132 et 133, renfermant les trois abaques, les différents axes se rencontrent au point o.

L'axe des taux est à 45° sur celui des sections et l'axe des intensités à 135° sur le même axe.

Échelles. — Les abaques des taux et des intensités ont été construits en représentant la valeur de log. 10 par 20mm. Cette même valeur dans l'abaque des sections, est représentée par 28,2mm.

Exemple. — Soit à transmettre une énergie de 50 chevaux sous une tension de 1 000 volts ; quelle sera la section la plus avantageuse à adopter pour le cas d'une canalisation à 4 ou 3 fils de ligne, en admettant que la location annuelle

Digitized by Google

du cheval-vapeur soit de 200 francs et que le taux de l'intérêt et d'amortissement est de 20 %, le prix du cuivre étant 2 francs le kilog ?

Solution analytique. — Traité par la règle de Lord Kelvin, nous trouvons, pour une canalisation à 4 fils,

$$S = 20\sqrt{\frac{0{,}00016 \times 200}{736 \times 0{,}89 \times 2 \times 0{,}2}} = 0{,}22 \text{ cm}^2.$$

Pour une canalisation à 3 fils de ligne la section du fil d'aller :

$$S_1 = \frac{1}{1{,}14} \times 0{,}22 = 0{,}193 \text{ cm}^2$$

et pour le fil de retour :

$$S_2 = 1{,}33 \times 0{,}193 = 0{,}256 \text{ cm}^2.$$

Solution graphique. — Le tableau I établi précédemment nous donne directement l'ampérage requis par cheval-vapeur, soit en chiffres ronds 20 ampères pour l'énergie demandée. L'intersection de l'ordonnée passant par ce point et la droite correspondant à 200 francs de location, nous donne un premier point M. Le taux étant de 20 %, l'ordonnée passant par ce point coupe la droite déterminée par le prix du cuivre (2 fr. le kilog.) en un second point).

Les droites parallèles à leurs axes d'abscisses respectifs et passant par ces points se rencontrent en μ. L'abscisse de ce point nous donne : sur A'A, la section pour une canalisation à 4 fils, soit : 0,21 cm².

Sur B'B et C'C les sections des fils d'aller et de retour pour une canalisation à 3 fils, soient :

$$S_1 = 0{,}18 \text{ cm}^2 \quad \text{et} \quad S_2 = 0{,}25 \text{ cm}^2.$$

Digitized by Google

ÉQUIPEMENT.

Une canalisation peut être souterraine ou aérienne. Cette dernière est plus économique au point de vue de la construction, mais par contre les frais d'entretien sont plus grands.

Elles coûtent, de ce chef, environ 10 % du prix de revient, tandis que pour les souterraines on n'atteint que le chiffre de 2 à 3 %.

Dans une canalisation aérienne, les fils sont isolés ou nus et supportés par des poteaux en bois ou en fer. Ces derniers coûtent plus de 1er établissement, mais ils ont une plus grande durée et peuvent supporter un poids beaucoup plus grand.

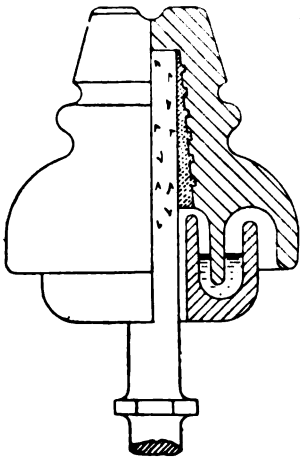


Fig. 36.

Les isolateurs doivent être confectionnés de façon à éviter le plus possible les pertes par la surface et à assurer un isolement parfait par tous les temps. Ils sont

Digitized by Google

généralement en porcelaine vitrifiée, faite spécialement pour les hautes tensions, ou bien sont des isolateurs à huile.

La fig. 36 représente un isolateur à double cloche et à huile analogue à celui étudié par M. le professeur Mengarini, très bien approprié pour les hautes tensions.

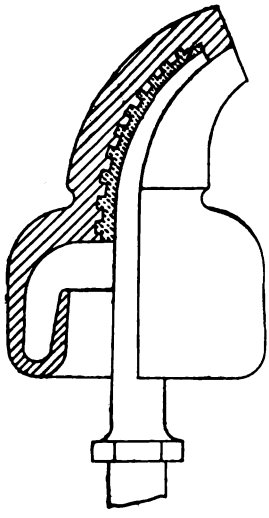


Fig. 37.

La fig. 37 un isolateur ordinaire de fin de ligne.

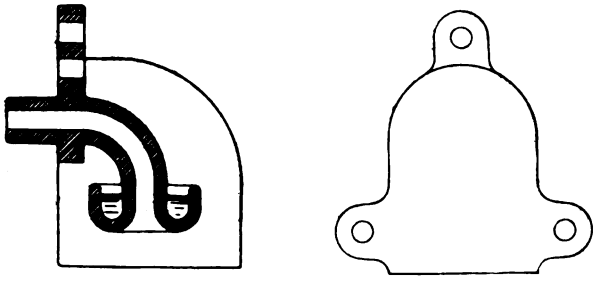


Fig. 38.

Digitized by Google

La fig. 38 représente un isolateur de sortie.

La fig. 39 représente une combinaison souvent adoptée pour connecter une ligne aérienne avec une ligne souterraine.

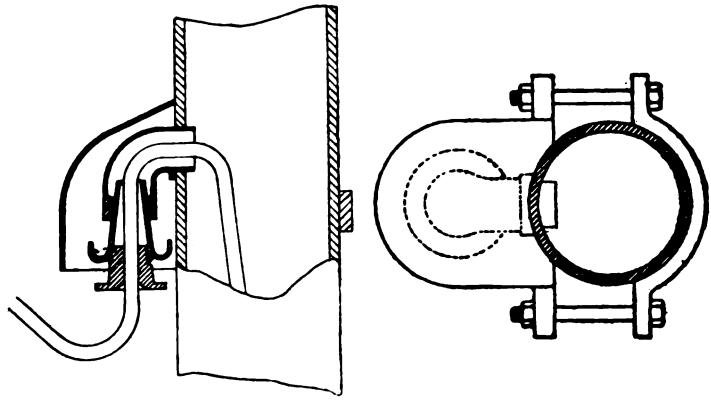


Fig. 39.

Des précautions spéciales doivent être prises pour protéger l'installation contre les effets de la foudre.

On place des parafoudres à chaque entrée ou à chaque sortie de terre, afin de protéger le câble souterrain contre les détériorations dues aux décharges atmosphériques.

Une très ingénieuse combinaison est celle du parafoudre de M. Brown, qui remplit en même temps l'office d'interrupteur bipolaire et de coupe-circuits fusibles. En voici la description d'après M. Boucherot. Il est constitué par une pile de rondelles de zinc, séparées par des rondelles de mica, le milieu de cette pile étant relié électriquement à l'enveloppe et à la terre et les deux extrémités aux pôles, le couvercle de la boîte porte sur un socle en marbre les plombs et les brosses de contact des interrupteurs ; le fait d'enlever le couvercle de la boîte coupe le circuit sur chaque pôle.

Digitized by Google

Pendant les temps d'orage, les fils se déchargent continuellement à la terre, par les piles de rondelles en formant autour une gaîne lumineuse; si l'arc vient à jaillir entre un pôle et la terre ou entre les deux pôles, le zinc jouit de la pro-

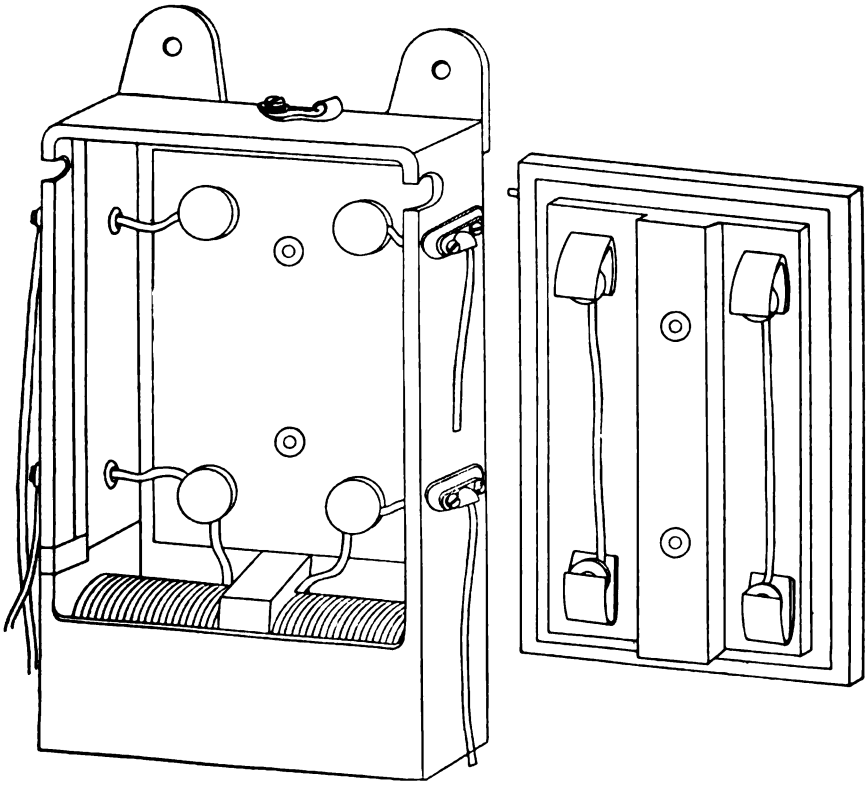


Fig. 40.

priété (soit par les fumées d'oxyde, soit pour toute autre cause) d'éviter que l'arc tienne après le passage de la décharge. Le dispositif de ce parafoudre est représenté dans la fig. 40.

Afin de donner une idée de l'extension des courants

Digitized by Google

biphasés dans l'industrie, nous signalerons parmi le grand nombre d'installations de ce genre faites en France :

1° Celle des Aciéries de France à Isbergues (Pas-de-Calais), comprenant 1 génératrice de 300 chevaux à 300 volts, employée : A.) Pour l'éclairage par incandescence dont la tension est abaissée à 110 volts ; B.) Pour le transport de force qui comprend : 3 ponts roulants de 25, 7 et 6 tonnes ; chaque manœuvre se faisant par moteur spécial. D'un moteur de 25 chevaux pour une défourneuse à coke. De deux moteurs de 5 chevaux commandant les monte-charges des cubilots, et enfin de trois moteurs de 1 à 5 chevaux accouplés à des ventilateurs.

2° Celle de la Cie des docks et entrepôts du Havre. Elle se compose d'une génératrice de 75 chevaux à 400 volts, actionnant des treuils système Singre pour le déchargement des navires. Chaque treuil absorbe 7 à 8 chevaux et manœuvre des charges de 300 kilog.

Un moteur de 5 chevaux commandant une chaîne à godets pour le débarquement des grains en vrac

Quatre treuils pour la manœuvre des balles de cotons et quatre cabestans pour la manœuvre des wagons sur les voies.

Chacun de ces appareils comporte un moteur de 13 chevaux.

3° A la sucrerie de MM. Oger et Cie à Bertaucourt-Epourdon (Aisne), ayant deux génératrices de 20 chevaux à 110 volts, desservant l'éclairage ; une partie du courant est transformée à 500 volts pour commander à 800 mètres un moteur de 20 chevaux directement accouplé avec deux pompes Dumont conjuguées. La mise en marche du moteur ainsi que l'arrêt se font à la station génératrice.

Un moteur d'un cheval accouplé à un ventilateur à ailettes.

Nous citerons encore celles de la Fonderie et Hauts-

Digitized by Google

Fourneaux de MM. Capitain et Geny, à Bussy (Haute-Marne); de MM. Meunier, à Noisiel; de la Poudrerie nationale d'Angoulême, et plusieurs autres installations faites avec le matériel C.-E.-L. Brown Boveri, construit par les établissements de MM. Weyher et Richemond, de Pantin.

Nous signalerons, en outre, l'installation des papeteries de la Compagnie Vonwiller, faite par la maison Brown-Boveri, dans laquelle on utilise les chutes de Sesia (Italie), situées à 5 kilomètres des usines. La station centrale comprend trois génératrices de 265 chevaux chacune à 3600 volts avec une fréquence de 83 périodes par seconde. L'énergie fournie est transportée aux papeteries par une canalisation de quatre fils de ligne où elle est utilisée pour une distribution mixte.

Une autre installation pour transport d'énergie à grande distance a été établie aux mines d'or de Sheba, dans l'Afrique Australe par la maison Johnson et Phillips, de Londres.

La station centrale située à Queens River comprend trois turbines utilisant une chute d'eau d'environ neuf mètres. Elles actionnent trois génératrices dont chacune a une puissance de 175 chevaux tournant à une vitesse de 400 tours par minute et fournissant des courants biphasés sous une tension de 3,300 volts avec une fréquence de 100 périodes par seconde. L'énergie ainsi développée est envoyée par une canalisation à quatre fils à la sous-station de Sheba située à huit kilomètres de distance.

L'installation la plus importante est celle des chutes du Niagara, dont l'intéressante description est donnée par le numéro de l'*Electrical Engineer* (N. Y.), que nous avons mentionné.

Digitized by Google

Enfin, nous citerons encore comme exemple l'installation faite par la maison Schûckert, de Nuremberg, pour la distribution d'énergie dans la ville de Buda-Pesth. L'usine située à trois kilomètres de distance de la ville fournit de l'énergie, produite par des dynamos, transformée et transportée par une canalisation souterraine à quatre fils de ligne à une sous-station où elle alimente des moteurs biphasés accouplés directement chacun avec une génératrice à courant continu.

Disons en terminant les raisons qui ont fait choisir, dans presque toutes ces installations, les courants biphasés de préférence aux courants à une et trois phases.

1° Les génératrices et moteurs biphasés ont une puissance spécifique plus grande et un rendement plus élevé que les générateurs et moteurs à courant alternatif simple.

2° Les moteurs biphasés ont un démarrage beaucoup plus facile que les moteurs monophasés.

3° Les générateurs et moteurs biphasés sont plus simples de construction que les alternateurs à trois phases.

4° Les installations par courants biphasés se prêtent mieux à des distributions mixtes de force et d'éclairage que celles faites par courants triphasés

Reste à comparer maintenant ce système avec le courant continu.

Les alternateurs biphasés ont un rendement et une réaction d'induit identiques à celle des dynamos continues : le couplage en parallèle se fait pour ainsi dire avec la même facilité.

De plus, ils coûtent, y compris l'excitatrice, 10 à 15 % moins cher que les dynamos.

Enfin, l'absence de collecteur diminue les frais d'entretien. La comparaison des appareils récepteurs montre d'une façon plus évidente encore la supériorité des courants à deux phases.

Digitized by Google

Les moteurs biphasés fonctionnent, aux phénomènes de self-induction près, comme un moteur shunt à courant continu et ont un rendement de 2 à 3 % supérieur à ces derniers, avec leurs appareils de démarrage; ils ont, à puissance égale, même prix que les continus. Seulement, leur vitesse de rotation étant moindre, on simplifie les transmissions mécaniques et on réduit également les trépidations; ce qui peut avoir de l'importance dans les salles contenant beaucoup de machines.

Les dépenses d'entretien sont réduites à leur minimum :

1° Par l'absence de balais et de collecteurs ;

2° Parce que personne ne doit être attaché à la surveillance des moteurs à champ tournant (*).

Enfin, l'emploi de l'électricité dans les mines et carrières montre encore, d'une façon évidente, la supériorité des courants biphasés.

Nous ne citerons comme preuve que les articles deux des chapitres IV et V relatifs aux installations électriques à l'intérieur des mines à grisou de la 1re et de la 2e catégorie :

« A l'exception des appareils dépourvus de collecteurs » et de balais, et présentant une sécurité absolue dans les » milieux grisouteux, les générateurs, récepteurs et trans- » formateurs ne pourront être établis que dans les puits, » sous-bures, travers bancs ou excavations diverses en » pierre, en communication avec les puits, chambres et » galeries ventilés par un courant d'air pur, n'ayant » passé sur aucun chantier de travail et dans lesquels » aucun afflux de grisou n'est à craindre. »

(*) Nous avons emprunté ces différents résultats aux intéressantes expériences faites par M. Boucherot.

Digitized by Google

Et l'article I de la 3e catégorie :

« L'emploi des générateurs d'électricité est interdit. » L'emploi des récepteurs et des transformateurs élec- » triques dépourvus de collecteurs et de balais et présen- » tant une sécurité absolue dans les milieux grisouteux » sont seuls autorisés. »

Donc, sans être cependant une solution générale, les courants biphasés présentent de grands avantages qui doivent les faire préférer au courant continu

Nous osons espérer que, dans un avenir prochain, certaines difficultés auxquelles se sont heurtés les électriciens seront résolues, et que ce système de courants pourra être appliqué à la traction.

(Applaudissements.)

M. De Bast, *président*, remercie les auteurs de cet intéressant travail et félicite le conférencier de l'exposé lucide qu'il en a fait.

M. L'Hoest propose d'ajourner la discussion de cette communication après publication au *Bulletin*. Adopté.

La séance est levée à midi et demi.

Digitized by Google

SÉANCE DU 31 JANVIER 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. André, Antoniotti-Bayet, Berlow, Briffaux, Caldarera, Cheftel, Coops-Busgers, De Bast, Decroës, Della Giusta, Del Proposto, de Luboradzki, de Sauteiron, Doppler, Duchesne, Henrion, Hyde, Jovignot, Larmoyer, L'Hoest, Maus, Mélotte, Moojen, Moriondi, Steels, Sweginski, van der Wallen, Van Musschenbroek, Viscidi, Walch, Weker.

M. De Bast, *président,* notifie à l'Assemblée la nomination de MM. Berlow, Compyn, de Sauteiron, Feron, Maus et Van Musschenbroek, en qualité de secrétaires-adjoints au Comité.

Il donne ensuite la parole à **M. Steels** pour la description du block-system automatique Hall. Cette description, qui sera publiée ultérieurement *in extenso*, amène le conférencier à constater le revirement d'opinion qui se fait en faveur des systèmes automatiques pour le cantonnement des trains. Il cite notamment les avis émis aux Congrès de Chemins de fer de 1892 et 1895, les derniers en date, bien plus favorables que les premiers au principe de l'automaticité.

Une courte discussion s'engage à la suite de cette communication, mais, vu l'heure avancée, l'Assemblée décide de la poursuivre après publication au *Bulletin* du travail de M. Steels.

M. De Bast, *président,* remercie l'auteur d'avoir fait part à l'Assemblée de l'application en Belgique du sys-

Digitized by Google

tème Hall et exprime l'espoir que M. Steels remettra à bref délai un manuscrit de sa communication au Secrétariat Général.

Avant de se séparer l'Assemblée procède à l'élection d'un septième commissaire.

M. D'Hoop est élu à cette fonction.

La séance est levée à une heure.

Digitized by Google

SÉANCE DU 28 FÉVRIER 1897.

Présidence de M. De Bast, président

Ont signé la liste de présence: MM. Andrews, Bardini, Bayet, Berlow, Briffaux, Caldarera, Calmeau, Cassa, Compyn, Coops-Busgers, De Bast, Debavelaere, Della Giusta, Del Proposto, de Luboradzki, de Sauteiron, Duchesne, Eric Gerard, Hourko, Jovignot, Kniphorst, Kroll, Larmoyer, L'Hoest, Mélotte, Moriondi, Nicolini, Polain, Van Asperen, Van der Wallen, Van Musschenbroek, Van Rijn, Viscidi, Walch, Weker.

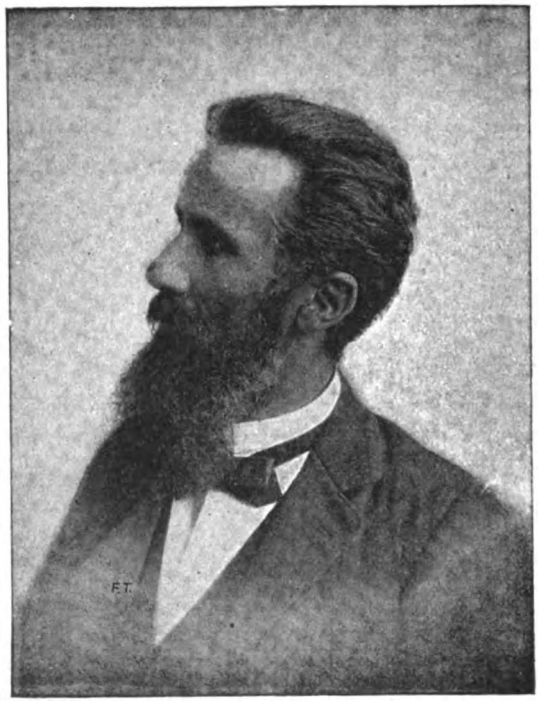
M. De Bast, *président,* fait part à l'Assemblée de la mort de M. Galilée Ferraris, membre d'honneur de l'Association; le Comité a transmis à la famille les condoléances de l'Association. D'autre part, M. de Sauteiron s'est chargé de retracer ici la carrière de cet illustre savant, qui fut l'une des gloires de l'Italie.

M. de Sauteiron — Une existence chère à l'Italie et à la science, celle d'un des plus illustres membres honoraires de notre Association, s'est éteinte à Turin, le 7 de ce mois. Le professeur *Galilée Ferraris* est mort et l'écho douloureux de sa perte ne s'effacera pas de longtemps dans ceux qui, par la connaissance de ses œuvres et de sa vie, ont pu apprécier son intelligence hors ligne et sa laboriosité vraiment extraordinaire.

Né, le 3 octobre 1847, à Livorno Vecellese (village du Piémont), issu d'une famille dans laquelle l'idéalité de la patrie, de la science et du bien était un culte et une tradi-

Digitized by Google

tion, Galilée Ferraris se fit remarquer, dès le début de sa carrière, par son intelligence vigoureuse, riche d'une érudition profonde et douée de facultés particulièrement analytiques. Un mémoire sur: « *La Transmission télodynamique de Hirn* », publié au moment où il était reçu ingénieur, en 1869, commença à attirer sur lui l'attention des savants.



Peu de temps après, nommé assistant au cours de physique du Musée Industriel de Turin, il appliqua ses singulières facultés de recherches à développer et souvent

Digitized by Google

à devancer les progrès des applications de la science à l'industrie, se dédiant plus particulièrement aux découvertes dans le champ physico-mathématique.

Ses premiers ouvrages furent deux mémoires très appréciés sur : « *L'emploi des Boussoles ordinaires dans la mesure de l'intensité des courants électriques* » et sur « *Le nouveau commutateur Gueraschi* », et, peu de temps après, une œuvre plus importante sur la « *Théorie mathématique de la propagation de l'électricité dans les solides homogènes* », monographie d'une singulière importance, dans laquelle sont révélées, d'une façon spéciale, les aptitudes de l'auteur à analyser les phénomènes physiques et qui lui valut l'honneur d'être acclamé à l'unanimité, en 1872, membre agrégé de la faculté des sciences de l'Université de Turin, qui comprit toute la valeur de la haute intelligence qui se dévoilait ainsi.

Ses prévisions ne furent pas déçues, et, après cinq années d'études et d'expériences laborieuses, en 1877, une nouvelle publication venait ajouter un éclat particulier à la renommée de son auteur ; c'était son œuvre « *Sur les propriétés cardinales des instruments dioptriques* ».

En même temps, M. Ferraris était nommé successivement, sans concours et à approbation générale, professeur extraordinaire, et ordinaire ensuite, de physique technologique au Musée Industriel de Turin, en remplacement du titulaire, décédé en 1877; et, presque en même temps, le Ministère de la Guerre l'appelait à développer le cours de physique à l'École supérieure de Guerre, en le nommant professeur titulaire, distinction qui n'est accordée qu'en des cas exceptionnels aux civils.

Il publia ensuite plusieurs Mémoires dont les plus importants traitent la théorie du Téléphone ; parmi ceux-ci, je citerai « *Sur l'intensité des courants et des extracourants dans le téléphone* », qui contient les résultats

Digitized by Google

d'une des premières mesures sur l'intensité nécessaire pour produire un son sensible dans le téléphone.

La science de la technologie et de la chaleur occupa la partie principale de son cours régulier de physique technologique aux ingénieurs; et, sur cet argument, il publia un Mémoire ayant pour titre : « *D'une méthode pour la mesure de l'eau transportée mécaniquement par la vapeur.* »

En 1881, l'Exposition Internationale de Paris et le premier Congrès d'Électricité qui s'y réunit, attirèrent l'attention de M. Ferraris, ainsi que celle de plusieurs autres physiciens, vers l'électrotechnique, et le décidèrent à se dédier principalement à cette branche de physique appliquée dont l'importance augmentait chaque jour.

Le gouvernement italien le chargea, en qualité de délégué officiel, d'assister au Congrès et à la Conférence internationale sur les Unités électriques qui eurent lieu en 1882. En 1883, il fut nommé commissaire italien à l'Exposition d'électricité de Vienne. L'année suivante, il fut le promoteur et le président de la Section internationale d'électricité de l'Exposition générale de Turin.

Ce fut à cette occasion que M. Ferraris accomplit ses recherches théoriques et expérimentales sur les transformateurs Gaulard et Gibbs. Ces recherches furent des premières et des plus étendues relativement à l'étude des transformateurs, et laissèrent entrevoir la possibilité du transport économique de l'énergie électrique à distance.

Le professeur Ferraris, en suivant cette ligne d'études, exécuta, en 1885, de nombreuses mesures sur les transformateurs Zipernowsky, Dery, Blathi, à circuit magnétique fermé, et commença à porter son attention sur la théorie et les applications des courants alternatifs.

En août et en septembre de cette même année, il exécuta ses expériences classiques sur les rotations

Digitized by Google

électrodynamiques produites par les courants alternatifs, et démontra qu'il est possible d'obtenir un champ magnétique tournant au moyen de deux courants alternatifs de même période, mais de phase différente; ou, en d'autres termes, qu'il est possible de produire un mouvement de rotation uniforme en se servant de deux courants alternatifs. Il put ainsi faire construire un moteur à courants alternatifs asynchrone et sans commutateur ni collecteur.

Ces résultats permirent la résolution du problème de la transmission de l'énergie électrique à grande distance et valurent, à celui qui les avait découverts, une renommée vraiment universelle.

En 1886, il accomplit une longue série de recherches sur les transformateurs à courants alternatifs, et il en publia les résultats en 1887 sous le titre : « *Sur les différences de phases des courants, sur le retard de l'induction et sur la dispersion de l'énergie dans les transformateurs.* » Dans ce mémoire, il démontra, pour la première fois, la relation qui existe entre la différence de phase du courant primaire et de celui secondaire dans un transformateur et la perte d'énergie due à l'hystérésis et aux courants de Foucault.

L'auteur tira de cette relation une nouvelle méthode dont il se valut, dans cette même série d'expériences, pour la mesure du circuit primaire au moyen de trois électrodynamomètres.

Il continua ensuite à publier plusieurs notes sur la théorie des alternateurs, dont une des plus appréciées parut en 1893, c'est sa méthode « *Pour le Traitement des vecteurs tournants ou alternants avec application aux moteurs à courants alternatifs* ».

En 1886, M. Ferraris fonda à Turin l'École électrotechnique pour les ingénieurs et l'on peut dire qu'il s'y dédia

Digitized by Google

avec toute l'ardeur de sa belle âme passionnée pour la science et le désir de la rendre accessible à ses disciples.

Un article d'un des anciens élèves, paru à l'occasion de la mort du Maître dans un journal de Turin, peut donner une idée du culte, de la vénération qu'il inspirait à ceux qu'il savait si bien guider à travers les dédales de l'analyse des phénomènes complexes que l'électrotechnique présente.

Il serait trop long de rapporter ici cet article en entier, mais j'ai crû devoir le citer, car il en émane un tel effluve d'admiration et de reconnaissance sincère et spontanée au Maître, que nul éloge ne pourrait être plus cher à sa mémoire.

Son école, il le reconnut lui même plusieurs fois, fut sa première ambition ; et l'on peut bien dire qu'il mourut sur la brèche, car il dut interrompre sa dernière leçon pour s'aliter et fermer les yeux à jamais huit jours après.

Trois mois avant sa mort, il avait été nommé sénateur, et l'approbation fut générale pour la haute distinction accordée à son génie et à son opérosité.

En cette circonstance, il fut l'objet de manifestations touchantes et il eut l'occasion de dévoiler les trésors de poésie que sa grande âme contenait dans les discours qu'il prononça aux banquets qui lui furent offerts. D'ailleurs, le côté artistique de son intelligence se dévoilait par l'intérêt constant qu'il porta aux choses musicales Il faisait partie de la direction du Lycée musical de Turin, était un admirateur de Wagner, et, dans les derniers jours de sa maladie, il ne cessait de s'intéresser aux répétitions de l'opéra de « *Tristan et Iseult* », qui devait être joué au Théâtre Royal.

Le sillon tracé par Galilée Ferraris dans la voie de la science a un tel éclat, que son nom est destiné à la plus lointaine postérité ; toute sa vie laborieuse et féconde est

Digitized by Google

un exemple sublime qu'on ne saurait assez souvent rappeler à l'esprit.

« La perte d'Adam Ferraris, écrivait Garibaldi à l'un de ses amis (à propos de la bataille de Dijon, où le frère de Galilée Ferraris, médecin déjà renommé, avait, comme jadis en 1866 contre les Autrichiens et en 1867 à Monterotondo et à Mentana, vaillamment combattu en y trouvant la mort), fut grave pour l'Italie et pour moi. Vous ne direz jamais assez qui vaille à donner une idée du mérite de l'ami très précieux. L'Italie peut bien en être orgueilleuse. »

Ces mêmes mots peuvent s'appliquer au professeur Ferraris, l'Italie a le droit d'être fière d'une de ses gloires les plus belles et les plus pures.

Tous ceux qui ont le culte des grands idéaux, tous ceux qui honorent l'intelligence et la bonté dans leurs plus nobles manifestations s'inclineront toujours avec émotion devant le nom de Galilée Ferraris.

M. de Bast, *président.* — Je reçois à l'instant un télégramme de M. van Kesteren m'annonçant que ce camarade est absolument empêché de nous faire aujourd'hui sa communication sur les Tramways. Je prierai M. Bayet de nous exposer maintenant son travail sur la fabrication, par l'électrolyse, de la soude et des chlorates alcalins.

M. Bayet donne lecture de la Note suivante :

Fabrication par l'électrolyse des alcalis et chlorates alcalins.

La fabrication industrielle de la soude et de la potasse par les procédés électrolytiques, existe depuis plusieurs années. En 1889, le procédé Gall et de Montlaur fut mis en exploitation en France à Villers-sur-Hermes, et l'usine

Digitized by Google

de Vallorbes, mise en marche en 1891, possède une force motrice de 3,000 chevaux. En Allemagne, en Angleterre et dans d'autres pays encore, la fabrication électrolytique de la soude et des chlorates alcalins, a été inaugurée et se développe d'année en année. Les chlorures de sodium et de potassium sont les sels à électrolyser, en solution aqueuse; le chlore se portera au pôle positif ou anode; le *Na* ou le K se porteront au pôle négatif ou cathode Si cette dernière est constituée par du mercure, les métaux alcalins s'y dissoudront en formant un amalgame. Si la cathode est constituée par une plaque de fer ou de charbon, le *Na* qui se forme au pôle négatif réagira avec l'eau pour former de la soude. L'équation chimique de l'électrolyse serait donc dans ce cas $Na\,Cl + H^2\,O = Na\,O\,H + Cl + H$; il se dégage ainsi pendant l'électrolyse équivalent égal de chlore et d'hydrogène.

L'équivalent électrochimique de l'argent étant de 1,1183 milligramme par coulomb et le poids atomique de l'argent étant 107,66, on trouve que l'équivalent électrochimique de l'hydrogène est de 0,010411 milligramme par coulomb ou 0,03748 gramme par ampère-heure. Les poids atomiques du K, *Na*, *Cl*, étant respectivement 39, 23 et 35,5, on trouvera comme équivalent électrochimique de l'ampère-heure pour

K	1,46 gramme.
Na	0,862 gramme.
Cl	1,326 gramme.

Pour faire un kilog de *Na*, il faut donc $\frac{1000}{0,862} = 1160$ ampères-heures; pour faire un kilog de soude, dont le poids atomique est de 40, on devra dépenser $\frac{1160.23}{40} = 668$

Digitized by Google

ampères-heures et cette formation, lors de l'électrolyse du chlorure de sodium, fournira en même temps

$$668.1{,}326 = 0{,}885 \text{ kilog de } Cl.$$

$$668.0{,}03748 = 0{,}025 \text{ kilog d'H.}$$

Le voltage théorique nécessaire à l'électrolyse du $NaCl$ se déduit du nombre des calories absorbées par la réaction chimique à laquelle l'électrolyse donne lieu; il faut donc tenir compte des chaleurs de décomposition de $NaCl$ et de H O, et de la chaleur de formation de $NaOH$ dissous.

On trouve

$$- Na\,Cl = - 96{,}4$$

$$- H\;O = \frac{- 68{,}4}{- 164{,}8}$$

$$- 164{,}8 + (Na\,O\,H) = \frac{+ 111{,}8}{- 53 \text{ calories}}$$

Le voltage de l'électrolyse sera donc, d'après une formule connue,

$$E = \frac{53}{23{,}2} = 2{,}29 \text{ volts.}$$

M. Nourisson a montré qu'en ce qui concerne les métaux alcalins et alcalino-terreux, le voltage nécessaire à l'électrolyse est théoriquement le même pour tous les sels du même acide. Les chiffres trouvés par expérience et les chiffres calculés sont les suivants :

Digitized by Google

	Chlorures.	Bromures.	Iodures.	Sulfates.	Nitrates.	Chlorates.
Potassium	1,97	1,74	1,15	2,40	2,32	2,45
Sodium	2,10	1,71	1,19	2,40	2,36	2,42
Lithium	2,01	»	»	2,43	2,45	»
Calcium	1,95	1,71	1,16	»	2,28	»
Baryum	1,94	1,72	1,17	»	2,37	2,48
Ammonium	1,83	1,46	»	2,29	»	»
Valeurs calculées. . . .	2,02	1,75	1,16	2,15	2,07	2,07

Pour l'électrolyse des chlorures nous avons trouvé tantôt que le voltage théorique était 2,29 volts, tandis que M. Nourisson trouve 2,02. Cela provient de ce qu'il admet la formation de divers composés oxygénés du chlore; dans ce cas, le nombre de calories à fournir pendant l'électrolyse ne serait plus 53 comme nous l'avons calculé précédemment, mais $53 - 6 = 47$, d'où le voltage nécessaire serait $E = \frac{47}{23,2} = 2,02$ volts.

M. Oettel a déterminé directement la force électromotrice de polarisation dans l'électrolyse du $Na\,Cl$, en employant des électrodes rugueuses et poreuses et un galvanomètre à grande résistance et à lecture rapide. Il trouve 2,25 à 2,28 volts, ce qui concorde avec les résultats prévus par la théorie.

Si donc nous admettons le chiffre de 2,29 volts comme représentant le voltage nécessaire pour l'électrolyse, on trouve qu'il faut $668 \times 2,29 = 1530$ watts pour fournir un kilog de $Na\,O\,H$.

En pratique, on admet généralement un rendement en

Digitized by Google

ampère-heure de 80 % et un voltage de 3,5 volts aux bornes de l'électrolyseur; le rendement industriel en watts n'atteint donc que 52,3 % en moyenne. L'augmentation du voltage nécessaire est due à la résistance du bain, des diaphragmes et à la polarisation des électrodes.

Les tableaux suivants donnent les résistances électriques des solutions de N*a* C*l*, K C*l*, N*a* OH et K OH déterminées par Kohlrausch pour divers degrés de concentration des solutions.

Dans ces tableaux, R est la résistance en ohm par décimètre cube, c'est-à-dire la résistance d'une colonne de liquide ayant un décimètre carré de section et un décimètre de longueur.

CHLORURE DE SODIUM.

Concentration.	Température.	Densité.	R.
5 pour 100	18° C	1,0345	1,5022
10 —	18° C	1,0707	0,8334
15 —	18° C	1,1087	0,6156
20 —	18° C	1,1477	0,5155
25 —	18° C	1,1898	0,4726
26 —	18° C	1,1982	0,4621
26,4 —	18° C	1,2014	0,4680

Digitized by Google

HYDRATE DE SOUDE.

Concentration.	Température.	Densité.	R.
2,5 pour 100	15° C	1,0280	0,9258
5 —	15° C	1,0568	0,5113
10 —	15° C	1,1131	0,3223
15 —	15° C	1,1700	0,2908
20 —	15° C	1,2262	0,3081
25 —	15° C	1,2823	0,3710
30 —	15° C	1,3374	0,4986
35 —	15° C	1,3907	0,6695
40 —	15° C	1,4421	0,8671
42 —	15° C	1,4615	0,9481

CHLORURE DE POTASSIUM.

Concentration.	Température.	Densité.	R.
5 pour 100	18° C	1,0308	1,4626
10 —	18° C	1,0638	0,7422
15 —	18° C	1,0978	0,4994
20 —	18° C	1,1334	0,3767
25 —	18° C	1,1508	0,3590

Digitized by Google

HYDRATE DE POTASSE.

Concentration.	Température.	Densité.	R.
4,2 pour 100	15° C	1,0382	0,6873
8,4 —	15° C	1,0777	0,3697
12,6 —	15° C	1,1177	0,2675
16,8 —	15° C	1,1588	0,2209
21,0 —	15° C	1,2088	0,1972
25,2 —	15° C	1,2439	0,1864
29,4 —	15° C	1,2608	0,1854
33,6 —	15° C	1,3332	0,1929
37,8 —	15° C	1,3803	0,210
52,0 —	15° C	1,4798	0,2392

L'inspection de ces tableaux montre que, pour les chlorures, la résistance spécifique diminue au fur et à mesure que la concentration augmente, tandis que, pour les hydrates, on constate un minimum de résistance pour les concentrations moyennes.

***

La fabrication industrielle de la soude ou de la potasse se présente au premier abord, comme devant être aisée à réaliser par l'électrolyse, mais le problème n'est pas si facile qu'il le paraît à première vue, et nous n'en voulons pour preuve que le faible rendement industriel qu'on obtient.

Digitized by Google

Le voltage minimum de l'électrolyse est, avons nous dit, 2,29 volts, supérieur à celui nécessaire à l'électrolyse de l'eau ; celle-ci va donc se décomposer, ce qui constitue une perte d'énergie, et, de plus, l'oxygène prenant naissance au pôle positif, en même temps que le chlore, forme de l'anhydride hypochloreux qui, rencontrant la soude formée à la cathode, donnera des hypochlorites, puis des chlorates. Il faut donc empêcher les solutions de se mélanger et, pour cela, faire usage de diaphragmes, et ceux-ci devront pouvoir résister à l'action du chlore et de la soude, ce qui n'est pas facile à réaliser.

En règle générale, pour répondre au but à atteindre, l'électrolyseur devra donc satisfaire aux conditions suivantes :

1° Ce sera un récipient quelconque contenant l'électrolyte, muni d'un couvercle fermant hermétiquement et partagé en deux compartiments par un diaphragme plus ou moins complet, destiné à empêcher la solution et les gaz de se mélanger.

2° Les gaz dégagés aux électrodes, hydrogène au pôle négatif, chlore et oxygène au pôle positif, seront évacués par des orifices ménagés à cet effet, le chlore sera envoyé dans des lessives de chaux pour former du chlorure de chaux vendable, ou bien encore dans des solutions concentrées de potasse ou de soude pour y former des chlorates. Quand à l'hydrogène, on tâchera de lui trouver emploi.

3° Le diaphragme sera suffisamment poreux pour ne pas offrir une résistance notable au courant, mais il ne laissera pas passer les solutions d'un compartiment à l'autre, il sera en outre inattaquable au chlore et à la soude, ne s'encrassera pas, sera facilement démontable et remplaçable.

Digitized by Google

4° Les électrodes seront, dans la majeure partie des cas, en charbon à l'anode et en fer à la cathode et on tâchera de trouver des moyens pour réduire l'usure des anodes. De plus, des gaz se dégageant aux électrodes, celles-ci, en règle générale, seront disposées verticalement, pour faciliter ce dégagement.

Examinons maintenant les nombreux systèmes d'électrolyseurs ne visant que l'électrolyse des chlorures alcalins. Nous constatons d'abord que certains systèmes suppriment en partie le diaphragme ; voici la description que nous trouvons d'un système de ce genre, celui de Lake.

L'électrolyseur se compose d'une cuve cylindrique en fer, jouant le rôle de cathode et munie à sa base d'un orifice pour l'écoulement continu de la soude.

Ce cylindre est recouvert d'une cloche en terre réfractaire de moindre diamètre, s'engageant de quelques centimètres dans la cuve principale et fixée à celle-ci au moyen de supports. Cette cloche porte à son sommet un orifice pour le chargement de l'appareil et un tube de dégagement pour le chlore. L'anode est formée par cinq tiges de charbon fixées verticalement à la base de la cuve, par l'intermédiaire d'un support et d'une plateforme isolante. Leur disposition est telle, que le chlore, qui se dégage à leur surface, monte directement sous la cloche, en sorte que la zone annulaire, comprise entre cette dernière et la cuve, n'est pas contaminée par le gaz. La soude, formée au contact de la cuve, qui sert de cathode, s'écoule par diffusion le long des parois et s'échappe par la base de l'appareil. En somme, le diaphragme est ici constitué par une surface cylindrique imaginaire, qui serait le prolongement même de la cloche. Il n'y a donc pas, à proprement parler, de diaphragme, et il doit se former des

Digitized by Google

hypochlorites et des chlorates en assez grande quantité, car le chlore est soluble en certaine proportion dans la solution ; de plus, les remous produits dans le liquide par le dégagement des gaz, doivent aider à l'union du chlore et des alcalis formés.

Comme électrolyseur sans diaphragme, nous pouvons encore citer celui que représente la fig. 1.

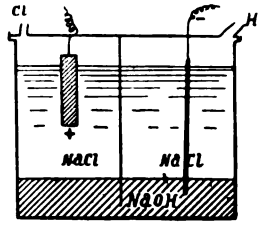


Fig. 1.

Si nous expérimentons le dispositif de la fig. 1 dans un vase en verre, l'électrolyte étant une solution saturée de $Na\ Cl$, chaude si possible, voici ce qu'on remarque au bout d'un certain temps. Du côté de l'anode et jusqu'à la profondeur que celle-ci atteint dans le liquide, on voit le liquide se teinter de jaune, puis, une fois cette couche formée, le chlore se dégage à l'état gazeux. En dessous, se trouve une couche d'électrolyte inaltéré, puis plus bas, suivant une tranche horizontale bien définie, la soude formée qui s'est répandue dans le compartiment de l'anode, et se maintient à une hauteur fixe tant que dure l'électrolyse. Si on fait arriver de l'électrolyte frais en dessous de l'anode et aussi doucement que possible, de manière que la partie inférieure de l'anode en soit toujours baignée et que l'électrolyte saturé de chlore s'échappe avec le chlore gazeux par un tuyau de trop

Digitized by Google

plein, tandis que l'hydrogène s'échappe par le tube H, on peut constituer de cette manière un électrolyseur convenable. Au bout d'un certain temps cependant l'électrolyte, dans le compartiment positif, se trouble et on distingue un précipité blanc qui tombe doucement dans le fond. Ce sont les sels de magnésium accompagnant *Na Cl*, qui se précipitent à l'état d'oxychlorures. L'inconvénient du dispositif de la fig. 1 est la grande résistance intérieure provenant du chemin que le courant doit parcourir.

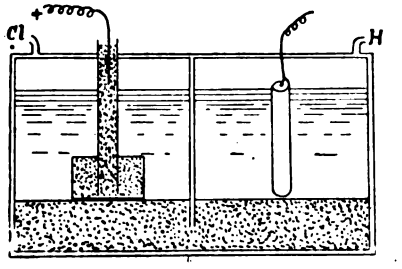


Fig. 2.

On peut modifier le dispositif de la fig. 1 en y intercalant un diaphragme : c'est l'électrolyseur de Craney, représenté par la fig. 2.

Le diaphragme est ici constitué par une couche poreuse mise à la partie inférieure de l'appareil et constituée par du sable, du verre pilé ou de l'asbeste. L'anode a ici une forme particulière ; elle se compose de morceaux de charbon de cornue concassés et empilés dans un tube et une cuvette formés de matière non conductrice. Le courant est amené par des lames ou tiges de charbon plongeant dans la masse. La fig. 3 donne une coupe à travers le compartiment négatif, celui-ci est partagé en plusieurs parties par des cloisons *c* plongeant plus ou moins dans

Digitized by Google

le liquide ; ce dernier circule de gauche à droite, suivant le parcours marqué par les flèches, de manière à venir en contact avec chacune des électrodes *l*.

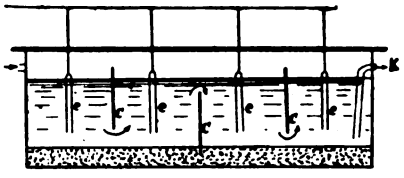


Fig. 3.

Au lieu d'employer du sable, verre pilé ou asbeste comme diaphragme, on pourrait encore employer, pour cet usage, le sel à électrolyser lui-même, en ayant soin, naturellement, de ne pas le laisser se dissoudre pendant l'électrolyse. L'emploi du sel à électrolyser comme diaphragme, a été, du reste, réalisé par Roberts et Caldwell. L'électrolyseur de Roberts se compose d'une cuve partagée en trois compartiments par deux cloisons ; les deux compartiments extrêmes contiennent les électrodes, le compartiment central le sel servant de diaphragme, par le fait que la moitié inférieure des deux cloisons est perforée d'un grand nombre de petits trous. On possède ainsi un diaphragme qui ne coûte rien, ne s'encrassant pas et n'offrant que très peu de résistance ; seulement, pour que ce diaphragme agisse, c'est à dire, empêche les solutions des compartiments positifs et négatifs de se rencontrer, il faut lui donner une épaisseur assez grande, et on arrive ainsi à augmenter la résistance du bain.

L'électrolyseur de Caldwell n'est ni aussi simple ni aussi bon ; on ne peut mieux se le représenter qu'en se figurant une cuve remplie de sel, dans lequel plongeraient les électrodes. Celles-ci sont en outre protégées de chaque

Digitized by Google

côté par un diaphragme compliqué, formé de morceaux de verre et de terre poreuse ; un faux fond sert à supporter la masse de sel et permet l'arrivée de l'électrolyte. Il y a donc ici, en réalité, deux diaphragmes, alors qu'un seul est plus que suffisant.

Dans les autres systèmes, nous trouvons des diaphragmes disposés verticalement ou horizontalement et ayant quelquefois la forme cylindrique ; ce qui, en réalité, différencie les systèmes, c'est la nature de la substance formant le diaphragme.

Dans le système Gall et de Montlaur, un des premiers employés industriellement, comme nous l'avons dit, le diaphragme est formé de tubes en terre poreux ; à l'intérieur du tube se trouve l'anode, à l'extérieur, la cathode enveloppant le tube à une faible distance, de manière à réduire autant que possible la résistance.

L'électrolyseur Greenwood est cylindrique et le diaphragme est constitué par une pile d'anneaux circulaires biseautés en verre, porcelaine ou ardoise, séparés par une matière poreuse et assez durable, de l'amiante, par exemple.

Un diaphragme intéressant est celui de Spilker, Löwe et Knöfler ; il est fait de parchemin végétal qui par l'attaque simultanée du chlore et de la soude serait rapidement détérioré.

Mais si on ajoute au liquide de l'anode 2 % environ de chlorure de calcium ou de magnésium, il se forme rapidement à la surface du parchemin un dépôt d'oxychlorure de calcium ou de magnésium ; lorsque la couche a atteint 7 à 8 millimètres d'épaisseur, on continue d'ajouter au liquide une certaine quantité de ces chlorures, de manière à maintenir l'épaisseur du diaphragme à peu près constante.

Digitized by Google

Les anciennes salines de l'Est font leurs diaphragmes au carbonate de chaux qui s'attaque, mais lentement.

Kellner emploie des plaques de savon, soit pur, soit mélangé d'amiante; Parker emploie le spath. Les autres systèmes proposés se servent de l'amiante comme matière principale et la protègent par des compositions spéciales : des silicates alcalins, du kaolin, etc.

Le procédé Hargreaves-Bird mérite une mention spéciale en ce qu'il se distingue de tous les autres par le fait que les cathodes ne sont pas plongées dans le liquide, mais s'appuient contre le diaphragme et ne sont mouillées que par capillarité.

L'électrolyseur se compose d'une cuve rectangulaire divisée en un certain nombre de compartiments par des diaphragmes entre lesquels sont disposés alternativement une anode et une cathode. Les cathodes sont formées d'un treillis de fils de cuivre et appuyées sur le diaphragme. Dans le compartiment positif, on verse une solution concentrée de *Na Cl*, tandis que dans le compartiment négatif on injecte de la vapeur d'eau chargée d'anhydride carbonique; la vapeur d'eau se condense et entraîne la soude sous forme de carbonate. La force électromotrice varie entre 3 et 3,5 volts et l'intensité du courant est de 2 ampères par décimètre carré.

M. Hargreaves estime qu'en se plaçant dans des conditions de fonctionnement normal il suffit d'une force de 2,000 chevaux électriques pour décomposer journellement 17,5 tonnes de sel et produire 26,25 tonnes de chlorure de chaux à 37 % de chlore, en admettant 7,5 % comme proportion de chlore inactif. A cette force correspond également une production de 15,75 tonnes de carbonate de soude à 58 % de soude.

Le système Parker et Robinson se distingue de tous ceux dont nous avons parlé jusqu'ici, en ce qu'il ajoute à

Digitized by Google

la liqueur du compartiment négatif des acides gras qui forment avec la soude des savons insolubles dans l'électrolyte et qui, plus légers que ce dernier, surnagent à la surface où il est facile de les recueillir. On pourra utiliser ces savons comme tels ou les traiter par l'anhydride carbonique qui régénérera l'acide gras et fournira du carbonate de soude.

Nous venons de parler des diaphragmes, disons quelques mots des anodes.

Celles-ci s'altèrent rapidement et on a cherché par différents moyens à les rendre plus durables. M. Liveing propose de les accoutumer au chlore en les portant à haute température dans une atmosphère de ce gaz.

MM. Girard et Street durcissent les électrodes en les soumettant à l'action de l'arc électrique dans un four approprié ; la température élevée qui se produit, suffit à provoquer une fusion partielle de la surface des charbons qui acquièrent ainsi une grande solidité et supportent mieux l'action du chlore. M. Castner soumet les électrodes en charbon à l'action du courant électrique, après les avoir placées dans du charbon de bois ; ainsi traitées, elles ressemblent à du graphite et résistent très bien à l'action du chlore.

M. Höpfner emploie des anodes en fer recouvertes de ferro-silicium.

Signalons enfin un procédé qui peut servir pour des expériences de laboratoire et consistant à recouvrir des lames de platine d'une couche de noir de platine. A cet effet, on électrolyse une solution de sulfate de zinc entre 2 feuilles de platine, le courant étant de 1 ampère par décimètre carré ; du zinc se dépose sur une des électrodes. On coupe alors le circuit et on attend 24 heures, au bout de ce temps, le zinc s'est redissous en totalité et les électrodes sont recouvertes de noir de platine.

Digitized by Google

* * *

Nous avons envisagé jusqu'à présent les systèmes où l'électrolyse donne directement de la soude, mais si celle-ci reste en solution, elle se décompose à son tour par électrolyse, à moins qu'on ne l'évacue au fur et à mesure de sa formation. C'est ce qu'on fait généralement, mais on n'obtient que des solutions fort étendues qu'il faut concentrer par évaporation pour en retirer le sel non transformé, puis finalement, évaporer à siccité pour retirer la soude.

Dans le but de se soustraire aux ennuis inhérents à la formation de la soude à l'intérieur de l'électrolyte, on emploie les procédés au mercure. Si la cathode est formée de mercure, il ne se forme plus de soude, mais un amalgame de sodium ; en mettant ce dernier en contact avec de l'eau dans un second bac, l'amalgame est détruit, le sodium s'allie avec l'eau pour former de la soude en donnant lieu à un dégagement d'hydrogène et le mercure régénéré retourne à l'électrolyseur.

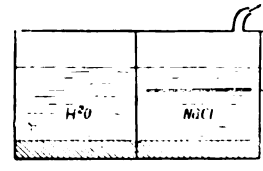


Fig. 4.

Tel est le principe de la méthode au mercure, et les inventeurs vont chercher à réaliser deux choses : 1° employer aussi peu de mercure que possible, et 2° retirer l'amalgame aussitôt formé de l'électrolyseur, pour qu'il ne soit pas détruit au contact de l'électrolyte.

Digitized by Google

Le plus simple de ces systèmes est celui de Despeisses. L'électrolyseur est formé par une caisse rectangulaire partagée en deux parties par une cloison s'arrêtant à quelques millimètres du fond (fig. 4). Un des compartiments contient une solution concentrée de sel et l'anode, l'autre compartiment de l'eau ; le fond de l'appareil est recouvert de mercure relié au pôle négatif et servant de cathode.

Il se forme donc un amalgame de sodium qui diffuse à travers le mercure et se rend dans le deuxième compartiment, où il est détruit par l'eau.

Un autre système, copie du premier, à part la forme donnée à l'électrolyseur qui est cylindrique, est celui de Sinding-Larsen (fig. 5).

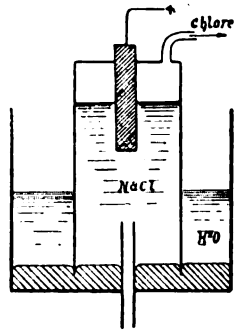


Fig. 5.

La seule différence que nous constatons, c'est que le niveau de la solution de $NaCl$ est plus haut que le niveau de l'eau, et que l'amenée de l'électrolyte se fait par le bas.

Ces deux systèmes sont basés sur la diffusion de l'amalgame dans le mercure ; or, l'amalgame étant plus léger que le mercure, surnage et la diffusion se fait mal.

Par contre, quelques systèmes ont mis à profit cette propriété de l'amalgame de surnager sur le mercure.

Digitized by Google

Dans le système Kellner, fig. 6 et 7, le couvercle de l'électrolyseur est percé d'ouvertures, dans lesquelles on loge des cylindres en terre vernis sur les côtés, le fond seul ne l'étant pas et constituant paroi poreuse. Cette dernière est recouverte d'une couche de mercure, formant cathode, recouverte d'eau. Les anodes peuvent être disposées verticalement, comme dans la fig. 6, ou horizontalement, comme dans la fig. 7. Dans ce dernier cas, on dispose un système protecteur au-dessus de

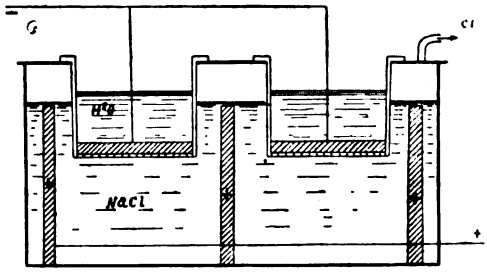


Fig. 6

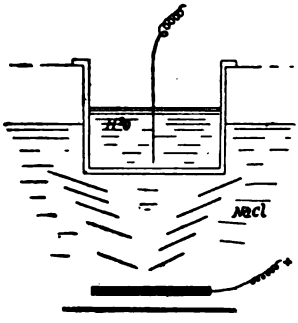


Fig. 7.

l'anode, pour que les bulles de chlore ne puissent venir au contact de la cloison poreuse. Le défaut de ce système est d'introduire un diaphragme résistant dans un procédé qui n'en réclame pas. Vautin emploie le même dispositif, sauf qu'il remplace la cloison en terre poreuse par une autre ayant un grand nombre de trous d'un diamètre assez petit pour que le mercure ne passe pas au travers des toiles, par exemple, ou des plaques perforées.

Les systèmes Sinding-Larsen sont représentés par les fig. 8, 9 et 10. Le premier (fig. 8 et 9) a pour principe de favoriser la réaction de l'eau avec l'amalgame de mercure, au moyen d'un trommel plongeant à la partie inférieure dans le mercure, où il se charge d'amalgame,

Digitized by Google

qui, pendant les 3/4 de la durée de rotation, sera mis en contact avec de l'eau. L'électrolyseur A est partagé en 2 parties par un cylindre B, qui sert de compartiment positif et est rempli d'électrolyte, le mercure formant joint hydraulique à la partie inférieure. Dans ce comparti-

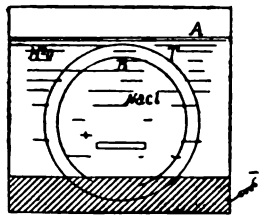


Fig. 8.

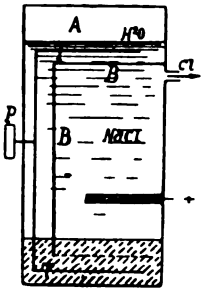


Fig. 9.

ment se trouve une anode en charbon, une entrée pour l'électrolyte et un départ pour le chlore. Le bac A est rempli d'eau et T est le trommel actionné par la poulie P.

La fig. 10 représente un autre appareil du même inventeur où le trommel est supprimé.

L'électrolyseur est partagé en 2 chambres A et B, la première renfermant de l'eau, la seconde une solution de sel. Le mercure recouvrant le fond de l'appareil forme joint et empêche les liquides de communiquer.

Par un dispositif non représenté sur le dessin, le mercure est animé d'un mouvement de translation dans l'espace annulaire entre les cloisons A' et B'. L'anode P est animée d'un mouvement de rotation au moyen d'une poulie P', dans le but d'empêcher l'adhérence des bulles de gaz. Le défaut de cet appareil, c'est la faible surface utile de la cathode, qui se compose du rectangle *a b c d*, alors que les dimensions de l'électrolyseur sont déjà importantes.

Digitized by Google

M. Kellner emploie un dispositif pour utiliser l'énergie qui se dégage pendant l'union de l'amalgame et de l'eau.

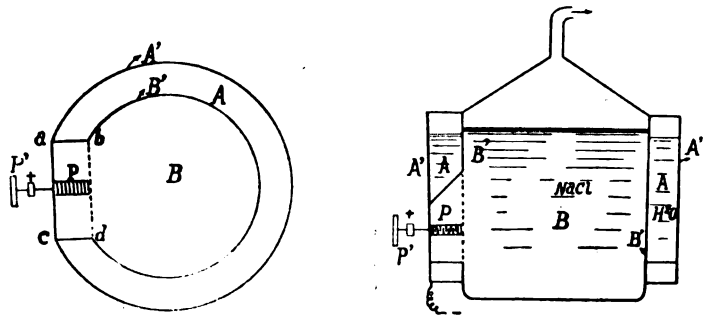


Fig. 10.

L'électrolyseur A (fig. 11) est une cuve cylindrique dont le fond en forme de tronc de cône contient le mercure servant de cathode, l'anode est constituée par une plaque inclinée vers le haut pour favoriser le départ des bulles de gaz; deux tuyaux permettent l'entrée et la sortie de l'électrolyte. Le mercure est traversé par le tube *a* débouchant à l'extérieur, au-dessus d'un entonnoir qui, par le tube *b*, amène le mercure à la partie inférieure d'une cuve B contenant de l'eau et dont le fond incliné est formé de petits gradins permettant un meilleur contact du mercure et de l'eau. Une électrode *d* sert à recueillir l'énergie dégagée par la réaction de l'amalgame et de l'eau, le mercure constituant l'autre pôle.

Le mercure, en sortant du bac B, passe dans un serpentin *e*, où il se refroidit, puis de là à une pompe qui le ramène à l'électrolyseur A.

Ce système nécessite une grande quantité de mercure, et la récupération d'énergie qui se fait dans le bac B ne doit pas être d'une grande valeur.

Digitized by Google

M. Kellner a breveté postérieurement un autre appareil représenté par la figure 12, dans lequel le mercure est mis alternativement en contact avec la solution de sel, puis

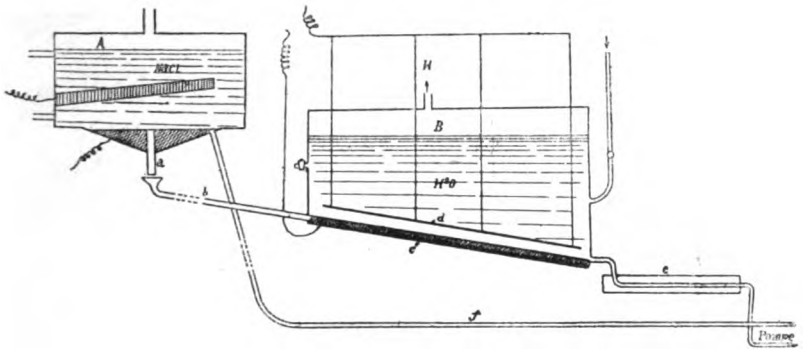


Fig. 11.

avec de l'eau, sans changer de place. La figure 12 montre que l'électrolyseur est partagé en deux compartiments contenant l'un de l'eau, l'autre une solution de sel; en

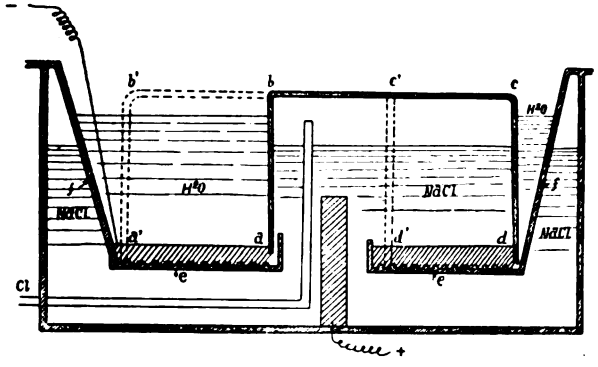


Fig. 12.

déplaçant la cloison *a b c d*, et l'amenant en *a' b' c' d'*, on voit que le mercure de gauche, primitivement en contact

Digitized by Google

avec l'eau, est maintenant au contact de la solution de sel, et que l'inverse a lieu pour le mercure placé à droite dans la figure.

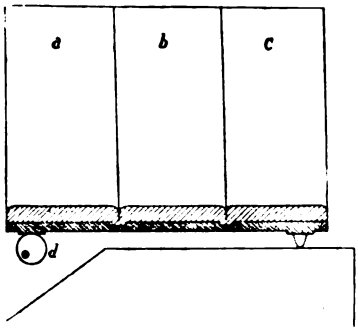


Fig. 13.

L'appareil Castner (fig. 13) est plus simple : l'électrolyseur est partagé en trois compartiments par deux cloisons plongeant jusqu'à quelques millimètres du fond. Les deux compartiments *a* et *c* sont remplis d'électrolyte et contiennent, l'un l'anode, l'autre la cathode; le compartiment du milieu est rempli d'eau. L'électrolyseur est mis sur une table qui s'élève et s'abaisse au moyen d'un excentrique *d*. De cette manière, le mercure passe des compartiments extrêmes dans celui du milieu, contenant l'eau, où l'amalgame est détruit.

Voici les dimensions d'un électrolyseur de ce genre:

Longueur, 1,80 m.
Largeur, 0,91 m.
Profondeur, 0,15 m.

Sur le fond repose une couche de mercure de 3,5 à 4 mill. d'épaisseur, ce qui représente environ 80 kilogrammes de métal. Un électrolyseur de ce genre peut décomposer 26 kilogrammes de sel marin en 24 heures.

Voici quelques autres données fournies par l'inventeur :

Digitized by Google

Sel décomposé	par ampère-heure,	1,92	gramme.
» »	par watt-heure,	0,48	»
» »	par cheval-heure,	295,00	»
Soude caustique	» »	209,00	»

Une des objections que le procédé au mercure soulève est la présence possible de ce métal dans l'atmosphère des usines, ce qui pourrait occasionner des empoisonnements.

D'après un rapport fait sur l'usine d'Oldbury, où le procédé Castner fonctionne depuis trois ans, il résulte qu'aucun cas d'empoisonnement n'aurait été constaté et que la perte en mercure résultant des manipulations serait de 186 grammes par tonne de soude produite.

D'un autre côté, les procédés sans mercure ont à compter avec l'usure des diaphragmes qu'ils emploient. M. Hargreaves assure que ses diaphragmes peuvent fonctionner pendant deux mois et que les frais résultant de leur emploi varient de fr. 1,25 à 1,75 par tonne de produits obtenus.

* * *

Une question importante est celle de savoir si le procédé électrochimique est économique

M. Hausserman a traité ce problème d'une manière complète dans un article paru dans le *Zeitschrift fur Elektrochemie*, tome 11, travail qui est résumé dans le deuxième supplément au Dictionnaire de Wurtz, pages 426 et 427. L'auteur prend comme exemple une usine produisant par jour 5,000 kilogs de soude caustique à 96 % et la quantité correspondante de chlorure de chaux, soit 12,500 kilog.

Les frais journaliers pour une telle production avec une usine marchant à vapeur s'élèveraient à la somme de 2,533 francs.

Aux prix de vente actuels, la production journalière donnerait :

Digitized by Google

5,000 kilog. de soude caustique à fr. 250 la tonne	fr.	1,250
12,500 kilog. de chlorure de chaux à fr. 200 la tonne	»	2,500
	fr.	3,750

soit un bénéfice de 1,227 fr. par jour, ou de 440,000 fr. par an environ.

Le prix de l'usine à vapeur serait, d'après Hausserman, de 1,200,000 francs, et de 1,800,000 francs d'après l'auteur de l'article du supplément de Wurtz, qui envisage le cas d'une usine marchant avec des moteurs à gaz pauvre. Je ferai seulement remarquer que l'augmentation de 600,000 francs qu'on trouve dans la seconde estimation provient moins de l'emploi des gaz pauvres que de ce que l'auteur a calculé plus largement les dépenses.

L'emploi des moteurs à gaz pauvre est au contraire à conseiller.

Les calculs de M. Hausserman se rapportent au cas de l'électrolyse directe, c'est à dire avec diaphragmes et sans mercure. Au point de vue économique, à part la question de l'usure des diaphragmes et des pertes de mercure, le système au mercure a l'avantage de donner des solutions plus concentrées que les procédés directs, et il en résultera donc une économie dans la dépense en charbon nécessaire pour produire la concentration et l'évaporation des solutions.

Doit-on faire de la soude ou du carbonate de soude, produit dont l'industrie a besoin en si grande quantité.

Les procédés Horgreaves-Bird, et Parker-Robinson produisent directement le carbonate de soude, ainsi que nous l'avons vu, et la concentration des solutions s'obtient en faisant arriver par un moyen facile à imaginer

Digitized by Google

les solutions en contact avec les gaz perdus des chaudières. On obtient ainsi des cristaux de carbonate de soude mélangé de chlorure; on les redissout dans la quantité d'eau nécessaire, le chlorure cristalise, et est repris pour être réemployé ; puis on laisse cristaliser le carbonate.

Il y a donc ici économie de combustible, la solution pouvant sans inconvénient être mise au contact des gaz des chaudières chargées d'anhydride carbonique, et en second lieu on recueille un poids plus grand de $Na\ Co^3$, que de $Na\ OH$, pour la même dépense d'énergie électrique. Il n'est donc pas impossible qu'on ait plus d'avantage à produire le carbonate que l'hydrate.

En tout cas, il est un fait important, sur lequel il est bon d'attirer l'attention, c'est que, dans la fabrication électrolytique de la soude, le chlorure de chaux n'est pas un sous-produit, mais que, bien au contraire, c'est le produit principal, car, ainsi que nous l'avons vu plus haut dans l'exemple choisi, la vente journalière du chlorure de chaux est de 2,500 francs, tandis que celle de la soude atteint juste la moitié de ce chiffre soit 1,250 francs. Il en résulte que le jour où le blanchîment électrique sera devenu plus économique que le procédé actuel au chlorure de chaux, il faudra trouver une autre utilisation du chlore dégagé pendant l'électrolyse, sous peine de voir disparaître la fabrication électrolytique de la soude.

Hypochlorites et chlorates alcalins.

Si, dans l'électrolyse d'une solution saline, nous n'employons pas de cathode de mercure, ni de diaphragme, la soude formée rencontrant du chlore va donner naissance à de l'hypochlorite $Na\ OCl$; puis, si la tempéra-

Digitized by Google

ture est favorable, l'hypochlorite formera du chlorate d'après l'équation.

$$3\,NaOCl = NaClO^3 + 2\,NaCl.$$

M. Oettel a publié dans le *Zeitschift für Elektrotechnik ùnd Electrochemie* (tome I, nos 11 et 15), un travail complet sur la question des hypochlorites et chlorates alcalins, où il examine l'influence des causes secondaires de l'électrolyse, qu'on néglige généralement et dont il montre la grande influence.

Pour se rendre compte de ce qui se passe pendant l'électrolyse, il met en tension dans le même circuit l'électrolyseur d'expérience, un voltamètre à eau et un voltamètre à sulfate de cuivre. L'électrolyseur d'expérience est fermé hermétiquement par un couvercle et les gaz produits sont envoyés dans une éprouvette graduée de manière à permettre de mesurer le nombre de centimètres cubes de gaz produit pendant un temps donné; le couvercle est, en outre, percé d'un trou dans lequel on enfonce un tube allant jusqu'au fond de l'électrolyseur. Avec ce dispositif on pourra, quand on le voudra, prélever, au moyen d'une pipette, une certaine quantité d'électrolyte pour l'analyser.

Le voltamètre à eau mesurera le nombre de centimètres cubes d'hydrogène produit pendant un temps donné et le voltamètre à cuivre nous donnera, pendant toute la durée de l'expérience, un dépôt de cuivre dont le poids sera proportionnel au nombre d'ampères-heures fournis.

Prenons un exemple pour mieux faire saisir la méthode.

Supposons que, pendant la durée d'une expérience, on ait recueilli 40 centimètres cubes d'hydrogène dans le vol-

Digitized by Google

tamètre à eau ; pendant le même temps l'électrolyseur a produit 32 centimètres cubes de gaz composé comme suit :

Hydrogène	30 cm³
Oxygène	1,6 »
Chlore	0,4 »
	32 cm³

Des 30 centimètres cubes d'hydrogène, il faut retrancher la quantité correspondante à l'oxygène dégagé, soit 3,2 centimètres cubes, et celle correspondante au chlore dégagé 0,4. Il reste 30 — (3,2 + 0,4) = 26,4 centimètres cubes d'hydrogène.

Pendant le temps que nous produisions dans le voltamètre à eau 40 centimètres cubes d'hydrogène, l'électrolyseur n'en a fourni que 30, soit donc une perte de 10, soit en % du courant employé $\frac{10}{40} = 25\ \%$, qui ont été employé à réduire l'hypochlorite formé et à le ramener à l'état de chlorure.

La fraction de courant perdue par le fait de la décomposition de l'eau est $\frac{3,2}{40} = 8\ \%$ et celle correspondant à la quantité de chlore dégagée $\frac{0,4}{40} = 1,4\ \%$.

Enfin la fraction du courant utile sera donnée par la quantité d'hydrogène 26,4 centimètres cubes, qui eût été obtenue réellement si nous n'avions pas eu à faire le décompte de ce qui correspondait à l'oxygène et au chlore. Le rendement sera donc $\frac{26,4}{40} = 66\ \%$.

L'utilisation du courant aura été la suivante :

Hydrogène dégagé	66 %
Réduction de l'hychlorite . . .	25 »
Décomposition de l'eau . . .	8 »
Dégagement de chlore	1 »
Total. . .	100 %

Digitized by Google

En opérant de cette manière avec une solution neutre de chlorure à 20 %, les électrodes étant en platine, la densité de courant 720 ampères par mètre carré, et le voltage de 3,30 à 3,44 volts, on trouve les résultats suivants :

	Effet utile.	Décomposition de l'eau.	Réduction.
Après 10 minutes	80,29 %	0,72 %	18,99 %
» 60 »	36,46 »	5,05 »	58,49 »
» 120 »	19,20 »	8,70 »	72,10 »

Le voltamètre à sulfate de cuivre a donné 2,48 grammes de cuivre métallique correspondant à 2,786 grammes de chlore. En titrant la solution à la fin de l'expérience on trouve :

Chlore à l'état d'hypochlorite . .	0,8589 grammes.
» » de chlorate . . .	0,3411 »
Total. . .	1,200 grammes,

soit 43,07 % de la quantité théorique.

M. Oettel fait ensuite, au moyen de la même méthode, un grand nombre d'expériences dont je ne citerai que les principales.

1° Si on ajoute de l'acide chlorydique, il se décompose immédiatement avec dégagement de chlore.

2° Si on ajoute de la soude ou de la potasse on favorise la décomposition de l'eau.

3° La réduction de l'hypochlorite formé étant importante, il faut tâcher de réduire cette perte en augmentant

Digitized by Google

la densité de courant à la cathode. Avec une solution neutre à 20 % :

Densité de courant à l'anode = 146 ampères.
» » la cathode = 1460 »

On obtient après 120 minutes :

Effet utile	37,2 %
Décomposition de l'eau . .	24,19
Réduction de l'hypochlorite	38,61

Le rendement en chlore trouvé par la quantité de cuivre déposée et le titrage de la solution est de 52,8 %.

4° Si on augmente la densité à l'anode (1460) et qu'on diminue celle de la cathode (146), c'est-à-dire en se plaçant dans les meilleures dispositions pour favoriser la réduction de l'hypochlorite, on trouve après 120 minutes :

Effet utile	5,10 %
Décomposition de l'eau . .	1,78
Réduction de l'hypochlorite	93,12
Rendement en chlore . . .	17,37

5° Si on augmente la densité aux deux électrodes et qu'on la porte à 1 460 ampères, on trouve après 120 minutes :

Effet utile	29,76 %
Décomposition de l'eau . .	14,29
Réduction de l'hypochlorite	55,95
Rendement en chlore . . .	51,4

6° La conclusion à tirer de ces essais est qu'il est impossible d'obtenir une solution concentrée d'hypochlorite.

En opérant pendant 8 heures dans les conditions de l'expérience 5, l'auteur trouve que la concentration maximum n'est que 12,7 gr. de chlore actif par titre.

Il me semble que l'on peut faire un reproche à M. Oettel, c'est que, ayant reconnu l'influence réductrice de l'hydro-

Digitized by Google

gène, il n'ait pas essayé de la diminuer par un dispositif quelconque qui aurait eu pour but d'enlever l'hydrogène du bain aussitôt sa formation ; les résultats auraient pu être tout autres.

Avant de donner les résultats d'expériences sur les chlorates alcalins, M. Oettel a fait quelques recherches chimiques pour voir si l'équation

$$3\,Na\,OCl = Na\,ClO^3 + 2\,Na\,Cl,$$

qu'on donne pour expliquer la transformation de l'hypochlorite en chlorate est vraie

Il constate d'abord que :

1° Le chlorate de potasse en solution acide (acétique) est fortement réduit par le manganèse et le zinc

2° Le chlorate de potasse en solution alcaline n'est réduit que fort peu par l'aluminium.

Or, pendant l'électrolyse, la réduction du chlorate ne pourrait se faire qu'à la cathode, où la réaction est alcaline ; il en résulte qu'en électrolysant une solution de chlorate de potasse, on ne constate qu'une réduction insignifiante.

M. Oettel a ensuite cherché si l'hypochlorite se transforme à chaud en chlorate, et ne trouve pas la vérification de ce fait.

Mais si on dirige à froid un courant de chlore dans des flacons laveurs contenant une solution de soude ou de potasse, on constate que le chlore s'unit aux alcalis pour former des hypochlorites, puis le chlore agit directement sur l'hypochlorite et le transforme en chlorate Quand on juge la réaction terminée, on chasse par un courant d'air le chlore gazeux dissous, et le titrage de la solution montre que tout l'alcali est transformé en chlorate, et qu'il reste en solution un peu de chlore actif, sous forme d'acide hypochloreux peut-être.

Digitized by Google

La conclusion à tirer de ces essais, c'est que la formation des chlorates par l'électrolyse ne se fait pas suivant les réactions généralement admises. Suivant M. Oettel, il faut admettre que le chlore et la soude, formés dans l'électrolyseur, réagissent pour former de l'hypochlorite; celui-ci diffuse dans le liquide et est en grande partie réduit à la cathode à l'état de chlorure de sodium.

L'électrolyte contiendra toujours une partie d'hypochlorite non réduit, qui se trouve soumis à l'action du chlore de l'anode. Les réactions pouvant se produire seraient les suivantes :

$$Na\,ClO + 4\,Cl + H^2O = Na\,ClO^3 + 4\,HCl$$
$$HCl + Na\,ClO = NaCl + HClO$$
$$HCl + HClO = 2\,Cl + H^2O.$$

Pour obtenir l'effet maximum, en ce qui concerne la fabrication des chlorates, il faut :

1° Que l'hypochlorite soit isolé de la cathode pour n'être pas réduit ;

2° Que la soude formée n'aille de la cathode à l'anode, que lorsque l'hypochlorite produit antérieurement est transformé en chlorate.

On peut réaliser aisément ces conditions en employant un diaphragme et en envoyant la liqueur du compartiment négatif dans le compartiment positif ; on retombe seulement sur les ennuis que donnent les diaphragmes et sur la diminution de rendement due à leur résistance.

On peut aussi travailler sans diaphragme et agir sur les facteurs suivants : alcalinité, température et densité de courant à l'anode et à la cathode, pour obtenir un bon rendement.

M. Oettel montre qu'on peut, un des facteurs étant donné, faire arriver les trois autres, de manière à obtenir

Digitized by Google

le même résultat. En admettant un voltage de 3,3 volts aux bornes de l'électrolyseur et en fixant l'effet utile du courant à 52 %, il faudrait une force de 11,33 chevaux-heures électrique pour produire un kilog de chlorate.

Il existe encore un procédé plus simple pour produire les chlorates, c'est de faire passer un courant de chlore dans des barbotteurs contenant des lessives alcalines. C'est un procédé que l'on fait breveter actuellement. Les uns prennent des lessives d'hydrates, d'autres de carbonates, les troisièmes mélangent hydrates et carbonates, en plus ou moins grande proportion, les quatrièmes ajoutent un peu de chaux ou de baryte, etc.

Un procédé plus spécial a été breveté par M. Bayer, et, quoique ne réclamant pas l'électrolyse, pourrait cependant être utilisé. Il consiste à faire passer un courant de chlore dans de l'eau contenant de l'oxyde de zinc, qui se transforme en oxychlorure et puis en chlorate. Celui-ci formé, mis en présence de chlorure de potassium à chaud, réagit et il se forme du chlorate de potasse et de chlorure de zinc, produit vendable.

Je termine ici ce travail, le premier sur l'électrochimie qui ait été donné à notre Association, je crois. Ce ne sera certes pas le dernier qu'elle entendra, étant donné l'essor considérable que prendra l'électrochimie dans un avenir très-prochain.

M. de Bast, *président.* — Je remercie vivement M. Bayet de son intéressant travail sur l'électolyse ; ce sujet est trop délaissé chez nous, et nous devons espérer que la communication que nous venons d'entendre en appellera d'autres sur le même sujet. Je félicite M. Bayet de la clarté qu'il a mise à nous donner au pied levé une conférence aussi documentée *(Applaudissements).*

La séance est levée à midi et demi.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Rizzo, Guguelmo, avec Mlle Eve Dery, celui de notre camarade M. Verdeleanu, Léon, avec Mlle Joséphine Jamagne, et celui de notre camarade M. Van Kesteren, Charles, avec Mlle Lucie Masion.

* * *

Diagrammes de charge d'une station centrale combinée de traction et d'éclairage. (*) — Le sujet des stations centrales combinées de traction (tramway) et d'éclairage

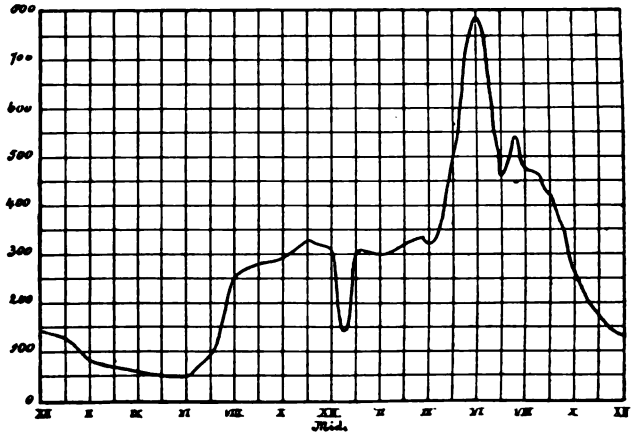


Fig. 1. — Courbe de la lumière à incandescence et de la puissance. — Système à 3 fils.

électriques actuellement, occupe tant l'attention des ingénieurs électriciens que les diagrammes représentant des

(*) « *The Electrician.* » January 8, 1897.

Digitized by Google

résultats pratiques ne peuvent manquer d'avoir grand intérêt.

Les diagrammes fig 1, 2 et 3, sont des courbes de charge :

Fig. 1, de distribution de puissance et de lumière à incandescence,

Fig. 2, de traction,

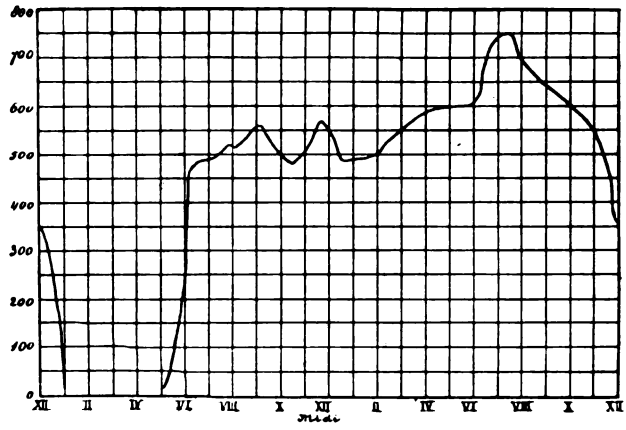


Fig. 2. — Courbe de charge du tramway.

Fig. 3, de lumière à arc,

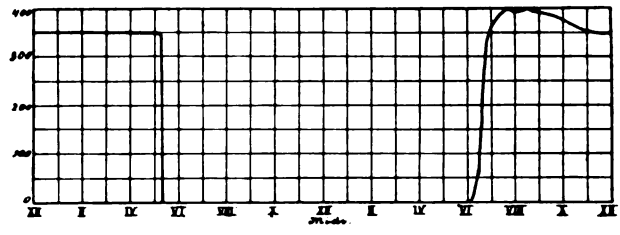


Fig. 3. — Courbe de la lumière à arc.

de la nouvelle station de la « Edison Illumating Company », à Paterson. N. J.

La fig. 4 donne le diagramme combiné représentant la

Digitized by Google

charge totale. Un coefficient de charge de 53 pour cent a été obtenu, quoiqu'il y aît une pointe combinée très défavorable dans les dernières heures de la journée. L'instal-

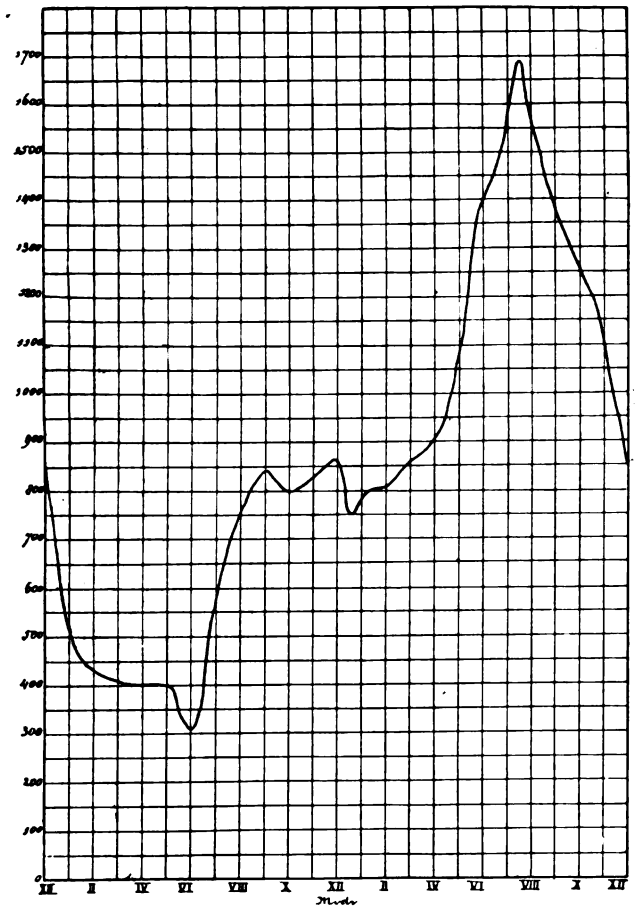


Fig. 4. — Courbe combinée.

lation génératrice comporte quatre machines à vapeur Ball and Wood, à condensation, de 600 chevaux chacune,

Digitized by Google

attaquant directement deux générateurs de traction G. E., 6 pôles, 225 kilowatts, 500 volts; deux machines à vapeur égales attaquant directement deux dynamos à lumière à incandescence G. E., 10 pôles, 200 kilowatts, et un couple de 315 chevaux pour le même but.

L'installation pour la lumière à arc compte 19 dynamos d'une capacité de 50 foyers et 4 de 125 foyers.

Les charges maxima, pendant le mois d'octobre 1896, furent :

780 kilowatts pour la fourniture de lumière à incandescence.

400 kilowatts pour l'éclairage à arc.

750 kilowatts pour les voitures.

P. V. M.

* * *

L'œil électrique (*). — Le docteur Jagadès Chunder Bosc, professeur au Présidency College de Calcutta, vient de trouver le moyen de percevoir une grande quantité d'ondes lumineuses jusqu'à présent invisibles pour nous.

Il a découvert que les lumières invisibles produites par les ondes électriques dans l'éther ont le pouvoir de traverser tous les corps opaques, sauf les grosses plaques métalliques, tout en conservant leurs propriétés actives.

L'appareil consiste en un générateur d'ondes électriques, en face duquel est un récepteur appelé œil électrique. Ce récepteur est une sorte d'écran où convergent les rayons invisibles ; il correspond à un nerf optique qui met en mouvement une autre partie de l'appareil jouant un rôle analogue à celui du cerveau. Le récepteur

(*) *L'Électricien*, n° 313, p. 408.

Digitized by Google

amplifie les vibrations premières et zèbre de rayons un appareil enregistreur.

Les ondes éthérées ne deviennent perceptibles par cet appareil qu'à partir de 200 billions de vibrations par seconde. Entre 200 et 400 billions, les vibrations produisent la sensation de chaleur ; entre 400 et 800 billions, celle de lumière, et au dessus tout échappe à notre organe visuel.

Le professeur Bosc a étudié le pouvoir réfractif des corps opaques et s'en est servi pour transmettre des signaux à distance.

En employant une lentille d'ébène, il est parvenu à transmettre un signal à la distance de 1500 mètres.

Il parvint à faire partir un pistolet chargé après avoir fait traverser par ses ondes un mur et un corps humain.

Les phares pourront dorénavant transpercer les brouillards, pourvu que les navires soient pourvus d'un œil électrique, qui verra et enregistrera l'invisible.

* * *

Les tramways électriques de Lugano. Emploi des courants triphasés (*). — Les essais ont été couronnés de succès. L'emploi des courants biphasés et triphasés dans la traction paraît avantageux.

Le système employé comprend deux câbles aériens avec deux trolleys en avance de 1 mètre l'un sur l'autre.

Comme avantages principaux :

Les trolleys ne quittent jamais simultanément les deux fils ; suppression complète d'étincelles et usure minimum du fil et des trolleys.

(*) *L'Électricien*, n° 315, p. 97.

Digitized by Google

Couple moteur considérable au démarrage, puisque la perméabilité magnétique du fer de ces moteurs est bien plus faible que celle des moteurs à courant continu.

Production facile de courant à haute tension et réduction par des appareils simples.

Plus d'extra-courants aux commutations.

Lorsque les résistances sont retirées du circuit, la vitesse est à peu près constante, quelle que soit la charge, d'où freinage automatique et économique : dans les pentes, le moteur actionné renvoie du courant dans la ligne sans qu'il soit nécessaire de changer les connexions.

Tension à la génératrice, 5,000 volts; aux moteurs, 400; fréquence, 80; longueur de la ligne, 4,900 mètres. Distance des fils aériens, 25 cm.; vitesse, 15 km. à l'heure.

* * *

Alternateurs Hutin-Leblanc-Farcot, installés à St-Ouen (*). — Ce sont des génératrices diphasées conduites et du type volant. Ils ont une capacité de 250 kw., le réseau d'utilisation ayant un cos φ sensiblement égal à l'unité. Chaque phase peut débiter 1,420 ampères sous 88 volts à la fréquence 39.

Chaque alternateur est mis en mouvement par un moteur de 400 chevaux, qui fait 65 tours par minute.

Inducteur volant. — Le circuit magnétique est formé de 36 groupes de piles de tôle $\frac{6}{10}$ isolées et boulonnées sur le volant. Il y a 72 pôles alternativement de noms contraires et les 72 bobines inductrices sont groupées en 4 circuits parallèles de 18 électros.

(*) *L'Électricien*, nº 317, p. 56.

Digitized by Google

L'un des alternateurs doit pouvoir servir comme moteur asynchrone, on a donc rendu le flux très uniforme dans l'entrefer en élargissant les épanouissements polaires au point de n'être séparés que par un intervalle de 10 millim. L'autre a ses épanouissements polaires coupés, ce qui économise l'excitation : celui-ci exige pour l'excitation 36 ampères sous 110 volts; celui-là 65 ampères seulement.

Le diamètre de l'inducteur est 5,351 m.; la largeur, 39 cm; l'entrefer, 8 millim.

Induit fixe. — Le circuit magnétique est formé de 36 piles de tôles isolées au papier et boulonnées sur les flasques en fonte de la carcasse.

Le bobinage est formé de grosses barres de cuivre carrées de 26,5 millim. de côté, occupant des trous percés dans des tôles aussi près que possible de l'alésage polaire.

Les connexions sont faites de façon à obtenir 2 circuits diphasés composés chacun de 2 groupes en quantité de 108 barres en série.

Section totale de conducteur par phase, 1 420 millim^2.

Résistance par phase, 0,0008 ohm.

Diam. extérieur de l'induit, 6,25 m.; largeur, 40 cm.

Canalisation entre l'induit et les transformateurs. — Elles sont constituées par de fortes lames de cuivre disposées à plat l'une sur l'autre pour 2 pôles de noms contraires. Il y a 2 paires de ces conducteurs pour chaque phase. On diminue ainsi autant que possible les chutes de potentiel réactives, en réduisant au minimum les flux embrassés par les conducteurs. Le débit élevé de 1 420 ampères donnerait une réactance inadmissible.

Transformateurs. — Portent la tension de 88 à 6 000 volts; Le circuit magnétique est du type à noyaux; longueur des noyaux et des culasses, 120 cm. Ils sont placés sur des isolateurs à huile.

Digitized by Google

Essais des alternateurs. — Indépendamment des essais à pleine charge qui ont donné d'excellents résultats, on a relevé les caractéristiques à vide et en court-circuit.

Pour l'alternateur dont les pièces polaires sont coupées, la caractéristique à vide est beaucoup plus relevée que pour l'autre, par suite des dérivations de flux de l'inducteur à pièces polaires très développées. Les caractéristiques en court-circuit sont à peu près identiques, ce qui prouve que les coefficients de self-induction sont sensiblement les mêmes dans les deux induits.

Rendement : Alternateur à pièces polaires coupées, 94,3 % (perte totale de 15,5 kilowatts) ; alternateur à pièces polaires très développées, 92,5 % (perte totale de 20,35 kilowatts). Après 8 heures de marche à pleine charge, la température de l'induit était de 40°,9 C ; celle de l'inducteur de 38° ; la tempéature ambiante était de 28°.

Essais des transformateurs. — Ils ont été expérimentés en court circuit avec leur enroulement de haute tension, ce qui a permis de mesurer les chutes de tension *réactives* dues aux dispersions du flux. Le coefficient de fuites magnétiques a été trouvé égal à 10 %.

Le rendement est de 96,7 % avec une perte totale de 8,88 kilowatts. Après 8 heures de marche à pleine charge, les températures étaient : Enroulement primaire , 68° C ; secondaire, 80° ; température extérieure, 28°.

Synchronisation. — Des essais ont été faits pour étudier les effets de synchronisation initiale des machines et leur marche en moteur synchrone. Les résultats trouvés ont été satisfaisants.

La disposition spéciale de ces machines a permis de vérifier optiquement la synchronisation ou glissement relatif.

Digitized by Google

Les deux alternateurs ont leurs électros identiques, et leurs arbres dans le prolongement l'un de l'autre. On peut donc considérer cette partie ajourée des inducteurs comme un écrou percé de trous et tournant synchroniquement avec eux. Dès lors, si on regarde les électros d'un alternateur à travers les électros de l'autre, on observe les phénomènes suivants :

Pour des vitesses très différentes, on n'aperçoit qu'une masse confuse.

Pour des vitesses identiques, les électros du second alternateur vus, au travers des électros du premier, paraissent fixés dans l'espace, par suite d'un effet stroboscopique

Pour des vitesses peu différentes, les électros semblent défiler dans un sens ou dans l'autre avec une vitesse égale à la différence des vitesses des deux machines.

Au moment de l'accrochage, on constate deux ou trois oscillations rapides de faible amplitude et immédiatement amorties : elles correspondent au ronflement.

Essais des circuits amortisseurs. — Afin de déterminer leur puissance synchronisante, il était nécessaire de déterminer le glissement d'un des alternateurs fonctionnant en moteur asynchrone entrainé par l'autre.

Pour l'alternateur à pièces polaires coupées, le glissement était de 0,6 %; il se réduisait à 0,1 % en débiellant le moteur à vapeur. L'autre alternateur avait un glissement de 0,4 %, tout en conservant les organes de la machine motrice. Ce faible glissement montre le rôle important des circuits amortisseurs ; les alternateurs en parallèle qui n'en sont pas munis ont un glissement minimum de 3 à 4 %.

Essais des alternateurs comme machines synchrones et asynchrones et fonctionnant comme moteurs et comme génératrices. — Ces essais ont montré que :

Digitized by Google

I. — Un alternateur synchrone fonctionnant comme moteur, doit recevoir de la ligne qui l'alimente les courants déwattés nécessaires à son excitation. Réciproquement, s'il est entraîné mécaniquement à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, il devient générateur ; il fournit du courant à la ligne à laquelle il est relié, à la condition que celle-ci lui donne encore l'excitation sous forme de courants déwattés

II. — Un moteur synchrone emprunte de l'énergie électrique à la ligne qui l'alimente ; mais l'excitation n'est pas empruntée au réseau, puisqu'elle doit être fournie sous forme de courant continu.

Les moteurs synchrones ont un facteur de puissance beaucoup plus élevé que les moteurs asynchrones ; s'ils sont suffisamment excités, leur cos φ peut devenir négatif. Dans ces conditions de surexcitation, les moteurs synchrones ne prennent plus de courant déwatté au réseau : ils lui fournissent au contraire des courants en avance de phase jusqu'à concurrence de leur débit maximum. Comme dans le cas de courants déwattés en arrière, ceux qui sont en avance peuvent servir à l'excitation des moteurs asynchrones, de telle sorte que, sur un réseau de distribution, il y aurait avantage à répartir les deux systèmes asynchrone et synchrone, de telle façon qu'ils se fassent équilibre, au point de vue de la fourniture des courants déwattés. Le facteur de puissance deviendrait alors égal à l'autre, ce qui serait avantageux à tous les points de vue.

La difficulté est d'obtenir le démarrage des moteurs synchrones. Ces propriétés caractéristiques s'appliquent aussi bien aux machines polyphasées qu'aux alternateurs ordinaires.

B. M.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

SÉANCE DU 28 MARS 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. André, Balachowsky, Bayet, Bede, Berlow, Caldarera, Cassa, Centonze, Compijn, De Bast, Del Monte, Del Proposto, de Luboradzki, de Muyser, De Ryckere, de Sauteiron, Doppler, Exelbirth, Haller, Henrion, Hourko, Hyde, Jovignot, Kniphorst, Kroll, Larmoyer, L'Hoest, Maus, Mavroïdis, Melotte, Noirfalise, Peltzer, Polain, Robert, L., Sée, Somerhausen, Sweginski, Tcherniak, Theunis, van Asperen, van der Wallen, van Kesteren, van Musschenbroek, van Rijn, Viscidi, Walch, Weker.

M. le Président communique à l'assemblée une demande de notre camarade, M. Horowitz, qui fait appel aux connaissances des membres de l'Association pour le renseigner sur les procédés électrolytiques d'extraction de l'étain dans les résidus métalliques des villes.

L'ordre du jour est ensuite abordé. La parole est donnée à **M. van Kesteren,** qui communique la note suivante :

Construction des lignes de tramways à traction électrique.

La communication que j'ai l'honneur de vous faire, n'est point un ensemble didactique ; c'est une partie du résumé des connaissances et des renseignements que j'ai été à même de recueillir pendant la période où j'étais attaché à une importante Société s'occupant principalement de la construction de lignes de tramways à traction élec-

Digitized by Google

trique. Je me propose de vous communiquer successivement des notes se rapportant au sujet que je développe maintenant et dont l'ensemble formera, j'espère, un recueil utile à consulter.

Le sujet de la construction des lignes de tramways à traction électrique présente un grand intérêt actuel en raison du prodigieux développement de ces lignes.

L'exemple nous est venu d'Amérique où le trolley eut le don de savoir se rendre rapidement très populaire, grâce à la simplicité d'installation et à l'économie des frais d'exploitation des lignes à traction aérienne.

Si les lignes de tramway ont été successivement installées à trolley, ce mode de traction n'a pas encore pu être appliqué économiquement aux lignes de chemins de fer, malgré les nombreux efforts développés de ce côté.

Il est intéressant de rapprocher de ce fait la communication de M. Wallace devant l'Institut américain des Ingénieurs civils, communication qui renfermait les réponses de diverses Compagnies d'électricité à 45 questions que l'auteur avait posées au sujet de l'établissement d'un chemin de fer électrique vers Chicago La longueur de la ligne était de 7 $^1/_2$ milles, la ligne était dans d'excellentes conditions topographiques et les rampes n'étaient pas supérieures à $^1/_2$ %. Il s'agissait de transporter à l'Exposition de Chicago un nombre de voyageurs variant de 10 000 à 30 000 par heure, au moyen de trains composés d'une voiture automotrice et de trois voitures remorquées; chaque voiture pouvait contenir 112 personnes ; la vitesse devait être de 32 km à l'heure environ. De plus, l'installation devait pouvoir continuer à donner des résultats d'exploitation économiques après la clôture du World's Fair. Bien que les conditions du problème ne présentassent rien d'extraordinaire, les Compagnies d'électricité questionnées arrivaient toutes à des frais d'entretien

Digitized by Google

beaucoup plus élevés que ceux occasionnés par l'emploi de la traction par la vapeur d'eau, de sorte que celle-ci fut adoptée.

Il est donc à prévoir que les autres systèmes de traction par l'électricité auront encore moins de chance d'être adoptés par les Compagnies de chemins de fer à cause, soit des frais d'entretien plus élevés qu'avec le trolley, soit des frais de premier établissement plus considérables qu'avec ce dernier mode de traction.

Quant aux promesses des divers inventeurs de chemins de fer électriques de réaliser pratiquement des vitesses de 200 et de 300 km à l'heure, je pense qu'il serait prudent de ne pas y attacher une grande importance. Un peu de réflexion suffit, en effet, à admettre qu'aucune voie normale ne serait capable de résister aux efforts et fatigues énormes créés par ces vitesses extraordinairement élevées, en admettant que celles-ci puissent être atteintes, même momentanément, ce qui est douteux, car la résistance de l'air est énorme malgré l'adoption de formes spéciales pour le front du train.

Ajoutons à cela la difficulté, pour ne pas dire l'impossibilité, d'obtenir un centrage des roues suffisamment exact et un graissage convenable ; nous n'aurons encore que quelques côtés difficiles du problème, posé au point de vue technique seul. Si l'on considère le côté financier, je crois que la difficulté consisterait, en grande partie, à trouver des financiers ayant confiance dans l'entreprise d'une construction de chemins de fer électriques à grande vitesse

Il n'en est heureusement pas de même des entreprises de lignes urbaines à traction électrique. Nous voyons, en effet, chaque jour se développer les réseaux existants, et nous assistons journellement à la transformation de lignes

Digitized by Google

de tramway à traction animale en lignes à traction électrique. La raison de ces faits réside dans l'économie des frais d'exploitation, jointe à une augmentation considérable des recettes fournies par l'adoption de l'électricité comme mode de traction dans les villes.

L'augmentation des recettes a principalement pour cause la plus grande rapidité donnée aux voitures, ce qui permet, avec un même nombre de voitures, d'effectuer un nombre de parcours plus élevé.

Puis le public aime à se voir transporté rapidement au lieu de destination ; il s'habituera à prendre plus fréquemment le tram pour pouvoir se rendre plus vite au but et économiser du temps. Ce fait est bien mis en évidence par le nombre croissant de trains en service sur des lignes existantes. Celles-ci, tout en conservant leurs longueurs respectives, verront généralement augmenter le nombre de voitures-kilomètres dans une forte proportion.

Nous voyons donc que si l'électricité ne semble pas de sitôt devoir remplacer la vapeur comme mode de traction, elle aura vite fait de s'emparer des lignes de tramway à traction animale. La statistique suivante, que j'emprunte à *l'Industrie électrique*, indique la longueur, la puissance en kw et le nombre des voitures automotrices se rapportant aux lignes de tramways européens en exploitation, en construction ou à l'état de projet au 1er janvier 1897.

Digitized by Google

ÉTATS.	LONGUEUR TOTALE EN KM.	PUISSANCE TOTALE EN KW	NOMBRE DES VOITURES MOTRICES.
Allemagne	642,69	18 963	1 631
Angleterre	109,42	4 670	168
Autriche-Hongrie .	83,89	2 389	194
Belgique	34,90	1 220	73
Bosnie.	5,60	75	6
Espagne	47,00	600	46
France	279,36	8 736	432
Hollande.	3,20	320	14
Irlande	18,00	486	32
Italie	115,67	5 970	289
Suède et Norwège .	7,50	225	15
Portugal	2,80	110	3
Roumanie	5,50	140	15
Russie.	14,75	870	48
Serbie.	10,00	200	11
Suisse.	78,75	2 622	129
Totaux. . .	1 459,03	47 596	3 100

Ajoutons à cela les lignes à traction mixte (trolley et accumulateurs) récemment installées à Hanovre et à Dresde.

Les répartitions des différents systèmes de traction électrique sont indiquées par la statistique suivante, également empruntée à l'*Industrie électrique*.

Digitized by Google

ÉTATS.	Système par trolley.	Système souterrain.	Système par rail central	Système par accumulateurs.	Total des lignes.
Allemagne. . . .	45	2	—	4	51
Angleterre. . . .	10	1	6	1	18
Autriche-Hongrie .	7	2	—	1	10
Belgique	4	1	—	—	5
Bosnie	1	—	—	—	1
Espagne	3	—	—	—	3
France	19	1	1	5	26
Hollande	—	—	—	1	1
Irlande	1	—	1	—	2
Italie	9	—	—	—	9
Suède et Norwège.	1	—	—	—	1
Portugal	1	—	—	—	1
Roumanie. . . .	1	—	—	—	1
Russie	2	1	—	—	3
Serbie	1	—	—	—	1
Suisse	17	—	—	—	17
Totaux. . .	122	8	8	12	150

Toujours, d'après les statistiques dressées par l'*Industrie Électrique*, on avait au 1er janvier 1896, pour les lignes de tramways en construction, en exploitation ou en projet en Europe :

Longueur totale des lignes en km	902 km
Puissance totale en kw	25 092 kw
Nombre de voitures motrices . . .	1 747

Digitized by Google

Applications du système			par trolley	91
»	»	»	souterrain	3
»	»	»	par rail central. . . .	9
»	»	»	par accumulateurs . .	8
			Total :	111

Les tableaux montrent que le réseau total s'est augmenté de 557,03 km ou de 61,755 % du total primitif, tandis que le total des lignes n'a subi qu'une augmentation de 26 %. L'augmentation du nombre des voitures automotrices est, par contre, de 77,44 % environ, ce qui prouve, à l'évidence, que, non seulement l'application de l'électricité comme mode de traction a eu pour résultat une augmentation du réseau général, mais qu'elle a surtout amené un trafic plus intense, car si le nombre total des km s'est accru d'environ 61,76 %, celui des voitures motrices — donc des trains — a subi un accroissement bien supérieur, se chiffrant à 77,44 % environ.

Je pense qu'il ne faut toutefois pas trop compter sur des augmentations aussi considérables lors de la construction d'une ligne future ; d'une part, la concurrence soustraira peu à peu le trafic de la ligne projetée ; d'autre part, les municipalités augmentent de plus en plus les redevances, de sorte que les compagnies se voient obligés de hausser les prix de transport et, finalement, les développements successifs peuvent amener cette circonstance parfaitement possible que le nombre des places disponibles finira par dépasser le nombre de voyageurs à transporter. Cette considération paraît futile, mais je crois qu'elle vaut la peine d'être soulevée ; il ne manque, en effet, pas d'exemples où l'on voit plusieurs lignes appartenant à autant de sociétés concourir au même point pour y « soutirer » tout le public, et, dans ce cas, il est à prévoir que le trafic de chaque ligne ne sera plus suffisamment alimenté, à moins d'éventualités spéciales et inattendues.

Digitized by Google

Ce qui tend encore à indiquer une augmentation de trafic par voiture automotrice ou par train, est la puissance moyenne par véhicule moteur, supérieure au 1er janvier 1897 à celle du 1er janvier 1896.

Au point de vue de l'étendue des lignes, on remarque que l'Allemagne tient la tête avec un total de 642,69 km, soit environ 44 % de l'ensemble des lignes européennes. Celles-ci, classée par pays, possèdent des pourcentages de km de lignes donnés par le tableau suivant dans lesquels les chiffres sont approximatifs :

ÉTATS.	POURCENTAGE DES LIGNES PAR RAPPORT AU TOTAL.
Allemagne	44
Angleterre	7,5
Autriche-Hongrie	5,75
Belgique	2,39
Bosnie	0,384
Espagne	3,22
France	19
Hollande	0,22
Irlande	1,24
Italie	7,9
Suède et Norwège	0,515
Portugal	0,19
Roumanie	0,377
Russie	1,1
Serbie	0,685
Suisse	5,4

En ce qui concerne le mode de traction, nous remarquons que le système par trolley est de beaucoup le plus répandu de tous. C'est lui qui, dès le début, a joui de la vogue générale. Continuera-t-il à se répandre dans les

Digitized by Google

mêmes proportions que jusque maintenant? Aux 1ers janvier 1896 et 1897, les lignes à trolley interviennent dans le total avec pourcentages sensiblement égaux ; il y a une légère diminution en janvier 1897, et il est à prévoir que le système par fil aérien perdra peu à peu de son terrain à cause des nombreux inconvénients qu'il occasionne.

Grâce aux perfectionnements continuels apportés dans la construction des autres modes de traction qui, jusqu'ici, se sont trouvés à leur enfance, on peut présumer leur développement, lent peut-être, mais sûr. Ces prévisions peuvent s'appliquer principalement aux systèmes par conducteurs souterrains et par accumulateurs, je pense. C'est surtout dans la voie de la traction par accumulateurs que les efforts des inventeurs se portent, et il ne serait donc pas improbable que d'ici peu de temps on soit parvenu à perfectionner ce mode de traction, de manière à pouvoir lui donner une extension beaucoup plus considérable.

Examinons successivement les différents modes de traction par courant continu les plus intéressants et les plus généralement répandus. Passons donc en revue les systèmes suivants :

1° Traction par fil aérien ou système par trolley ;

2° Traction par conducteurs souterrains ou système par caniveau ;

3° Traction par accumulateurs ;

4° Traction par accumulateurs et trolley combinés ou système mixte (Hanovre) ;

5° Traction par contacts successifs (Claret, Westinghouse).

Système par trolley. — Nous ne considérerons que le système par simple trolley de beaucoup plus étendu que celui à double trolley qui offre des difficultés d'exécution

Digitized by Google

non encore résolues d'une façon pratique et durable, surtout en ce qui concerne le maintien d'un isolement satisfaisant des deux fils de trolley.

Les avantages du système par conducteur aérien simple peuvent se résumer comme suit :

a) Installation rapide et facile; il n'y a que les courbes qui offrent quelques difficultés. Le montage suit la marche ci-après : transport des poteaux à pied d'œuvre — fixation des poteaux dans le sol, sur une profondeur d'environ 1m50, au moyen de béton ou de ciment très maigre. La composition 1 : 6 : 12 (1 partie de ciment, 6 parties de sable et 12 parties de briquaillons) suffit généralement. Ceci fait, on procède à la suspension du fil de trolley.

Pour opérer méthodiquement et rapidement, on la répartit sur deux brigades.

La première attache les fils de tension destinés à supporter les isolateurs qui portent le fil de trolley et donnent à ces fils une flèche en rapport avec la tension qu'ils devront supporter plus tard. Ceci dans le cas d'une ligne de trolley à poteaux simples sans consoles. Si la ligne est à poteaux consoles, la première brigade s'occupera du montage des isolateurs.

La seconde division des monteurs effectuera la suspension provisoire du fil, puis sa fixation définitive aux isolateurs. Cette opération doit être faite de manière que le fil de trolley ait la tension prescrite dans le cahier des charges et présente des flèches uniformes pour des distances égales entre deux isolateurs successifs. La tension est réglée pratiquement au moyen d'un dynamomètre attaché au bout du fil ou près d'un point de suspension, selon les circonstances. Elle varie généralement, entre 450 et 500 kg pour des fils en bronze phosphoreux de 8,25 m/m, conductibilité 98 %.

Digitized by Google

La tension des fils de suspension des isolateurs est très variable, surtout dans les courbes où la composition des forces du polygone funiculaire indique le nombre et la disposition de ces fils. Les fils de tension sont, en règle générale, en acier et ont des diamètres allant jusqu'à 6 m/m.

Le fil de trolley soumis à l'action du dynamomètre est tendu jusqu'à l'obtention de la tension prescrite. Ensuite, on procède à la fixation de ce fil aux isolateurs, soit par voie de soudure, soit par un sertissage ou un serrage par vis.

J'ai essayé d'esquisser, par ce qui précède, le montage de la ligne aérienne, passant sous silence des points pratiques sur lesquels je reviendrai plus tard.

Une brigade de monteurs composée de 8 à 10 hommes, travaillant pendant 10 heures par jour, peut installer 800 à 1600 mètres de fil de trolley en ligne droite, suivant le mode de suspension du fil et le système de fixation du fil de trolley à l'isolateur. Si celle-ci est une soudure, l'opération marche lentement, forcément.

b) Entretien peu coûteux. Je crois savoir que les frais d'entretien de la ligne de Bruxelles gare du Nord-gare du Midi sont approximativement de fr. 0,06 par V km (voiture-kilomètre). A Hambourg, ils s'élèveraient à fr. 0,10 et à Zurich à fr. 0,08 environ.

c) Frais du premier établissement peu élevés. Je ne puis citer, à cet égard, que des moyennes qui sont à majorer ou à diminuer selon l'exécution plus ou moins parfaite de la ligne. Le prix des rails entre pour une bonne part dans les frais de premier établissement, et la tendance actuelle étant d'adopter des rails de forts poids pour mieux assurer la stabilité de la voie, il faudra donc modifier les moyennes indiquées selon les circonstances.

Malgré les nombreux facteurs variables qui entrent

Digitized by Google

dans l'évaluation des frais de premier établissement, on peut estimer ceux-ci comme suit :

La dépense d'un poteau métallique simple, destiné à soutenir le fil de trolley au moyen d'un fil de tension, est approximativement de 300 francs mis en place. Avec la tension de 450 k, généralement prescrite pour le conducteur aérien normal de 8,25 millimètres de diamètre, la distance entre deux poteaux consécutifs est d'environ 40 mètres, de sorte qu'un kilomètre de ligne nécessite 50 poteaux.

Si l'on peut adopter des poteaux-consoles, il faut compter sur une dépense de 350 francs environ par poteau mis en place et pour simple voie. Pour une double voie, le renforcement du poteau porte le prix de celui-ci à 450 francs à peu près. On voit qu'il y a économie à faire usage de poteaux-consoles, car dans le cas le plus défavorable de l'établissement d'une ligne pour double voie, on aura par 40 mètres un poteau-console contre deux poteaux simples, et au lieu de 50 de ceux-ci par kilomètre de voie, il n'y a que 25 des premiers.

L'équipement de la ligne, confection de la voie et matériel électrique, exige pour la simple voie une dépense supplémentaire de 10 000 francs environ et pour la voie double un supplément de 7 000 francs au chiffre précédent. Je le répète, je n'indique que des moyennes, variables selon les circonstances, mais permettant, néanmoins, de se former une idée sur le total des frais de première installation par kilomètre de ligne à établir.

Bref, en recherchant le montant global de ceux-ci, on trouve que les dépenses se chiffrent, par km de voie, comme suit :

Voie simple	avec	poteaux	métalliques	simples	fr. 25 000
» double	»	»	»	»	» 32 000

Digitized by Google

Voie simple avec poteaux-consoles métalliques . . . . . fr. 20 000
Voie double avec poteaux-consoles métalliques . . . . . » 27 000

Ces chiffres ne se rapportent qu'à la voie droite, et je n'ai pas tenu compte ni des aiguillages, ni des courbes, qui occasionnent une majoration de 10 % environ des dépenses précédentes.

M. de Marchena, dans son intéressant ouvrage sur la traction mécanique des tramways, estime les frais de première installation par km de voie entre 20 000 et 30 000 francs, ce qui s'accorde avec ceux indiqués plus haut.

M. Uppenborn, dans un parallèle entre les systèmes par trolley et par accumulateurs, estime qu'un km de simple voie à conducteur aérien revient à 18 500 francs, tandis qu'un km de voie double, établie dans les mêmes conditions, reviendrait à 27 000 francs. L'écart entre ces chiffres et les précédents n'est pas bien considérable on le voit ; il porte probablement sur une différence d'exécution de la voie proprement dite.

d) Isolement satisfaisant. Contrairement à ce qu'on éprouve avec les systèmes concurrents, celui à trolley simple permet de limiter facilement la perte de courant sur la ligne, au moyen d'isolateurs de construction robuste et simple. Le système souterrain se trouve, à ce point de vue, dans une infériorité marquée, et, à en croire les renseignements qu'on ne se procure qu'avec peine sur les systèmes par contact, l'isolement y serait encore plus difficile à maintenir.

En ce qui concerne la ligne aérienne à double trolley, il sera prudent de compter sur une dépense supplémentaire de 4 000 à 6 000 francs, selon que la voie est simple

Digitized by Google

ou double. Il est curieux de rapprocher des chiffres ci-dessus ceux qui se rapportent à l'installation du chemin de fer électrique, dont il a été question plus haut.

M. Wallace renseigne une dépense de 325 000 dollars pour la longueur de 7 1/2 milles double voie, soit d'environ 139 500 francs par kilomètre de double voie.

A côté des avantages importants de la traction par trolley, il y a de nombreux inconvénients, dont les fréquentes manifestations commencent à attirer de plus en plus l'attention du public et des autorités. On peut les résumer comme suit :

a) L'installation du fil aérien avec ses accessoires, tels que fils de tension, isolateurs, poteaux, ancrages, ôte souvent aux voies publiques le peu de riant qu'on leur laisse quelquefois. Au lieu du sol en-dessous des pieds et le plein air au-dessus de la tête, on se verra bientôt comme enfermé dans une cage, dont le treillis est constitué par l'entrelacement des fils de trolley avec ses accessoires et par les fils téléphoniques de plus en plus nombreux, auxquels on pourra probablement bientôt ajouter les faisceaux de fils de garde tendus au-dessus du conducteur aérien pour protéger les fils de téléphone. En Europe, nous n'avons pas encore trop à nous plaindre sous ce rapport, quoique le fil aérien n'y soit pas installé avec plus d'élégance qu'en Amérique, mais c'est surtout d'après des photographies des grandes villes des États-Unis qu'on peut juger de l'effet de cage produit par le croisement des nombreux fils de trolley avec leurs fils de suspension, etc., et des fils de téléphone. Comme la présence de ces derniers est nécessaire et ne peut être supprimée, il serait désirable pour la sauvegarde de l'esthétique des rues et places publiques, de diminuer le plus possible le nombre des fils suspendus en l'air, en prohibant l'extension du

Digitized by Google

système à trolley, partout où l'on ne parviendrait pas à en cacher suffisamment l'aspect désagréable, et cela avec d'autant plus de raisons que le conducteur aérien ne constitue pas le seul moyen d'appliquer l'électricité à la traction.

Je sais que les « gens pratiques », c'est à dire ceux qui n'ont pas conscience de la possibilité d'associer l'utile au beau, trouve l'inconvénient précédent sans aucune importance, mais il est d'autres désavantages produits par la traction aérienne, et ceux-là auront le pouvoir de frapper davantage ces esprits utilitaires. Qu'on n'oublie pas, en effet, que la présence d'un fil de trolley dans des rues pas trop larges, constitue un obstacle sérieux, souvent aux manœuvres de pompiers en cas d'incendie, au point de rendre l'installation des échelles-télescopes presqu'impossible et le sauvetage ainsi que l'extinction du feu très difficiles.

b) Les fils de trolley exposent les passants à un danger continuel, à preuve les récents accidents de Bruxelles, pour ne considérer que la Belgique, et qu'on a voulu expliquer en faisant intervenir des causes perturbatrices, mais il n'en est pas moins certain que le fait existe

c) De plus, il me paraît difficile de nier que les conducteurs aériens sont souvent une entrave à la circulation des véhicules élevés, rares peut être, mais dont l'utilisation deviendrait de plus en plus restreinte avec le développement de la traction par trolley. Les Bruxellois, par exemple, amateurs de cortèges, de chars, devront renoncer à voir leur passion satisfaite le jour où le trolley fera son apparition au centre de leur ville.

d) Les fils téléphoniques et le conducteur aérien, quoique de la même famille, ne manquent pas de vivre en continuel désaccord ; le fil de trolley, comme le plus fort,

Digitized by Google

cause de grands dommages sous l'aspect de dérangements dans le service téléphonique. L'effet d'une ligne aérienne sur les câbles téléphoniques a été méthodiquement étudié par notre camarade van Vloten, qui a communiqué le résultat de ses recherches à l'Union Internationale des Tramways.

e) La proximité du fil de trolley et d'objets métalliques occasionnent l'électrolyse de ces derniers. Le danger qui résulte de ce phénomène est particulièrement grave si des conduites d'eau, d'air, de gaz ou d'électricité longent la voie du tramway ou procurent au courant un retour vers l'usine centrale plus facile que les rails. Malgré tous les efforts faits, on n'est pas encore parvenu à annuler cet effet électrolyseur, et le nombre très grand de tentatives dirigées dans ce sens prouve à l'évidence l'importance capitale de l'inconvénient que je viens de signaler.

f) Le diamètre relativement faible du fil de trolley ne permet évidemment pas le transport d'une grande énergie à des distances notables, vu que la tension maximum admise ne dépasse pas 550 V environ et que la perte de charge ne doit pas dépasser 15 % pour un voltage général de 500. On remarque, en effet, que si l'on dépasse cette perte, notamment aux points d'arrêt et de commencement de rampe, le collecteur du ou des moteurs de la voiture automotrice se détériore très rapidement en raison du crachement des balais ; la tension étant relativement basse, on conçoit que le courant qui parcourt l'induit du moteur doit être fort dense pour que la résistance soit vaincue, donc on n'aura pas seulement des balais crachant outre mesure, mais encore un échauffement intempestif des fils d'induit avec tous les inconvénients et les dangers qui s'en suivent. La nécessité de limiter la perte de tension dans des limites assez étroites conduit à un

Digitized by Google

développement de feeders qu'il est possible de restreindre dans le système à caniveau, où les conducteurs électriques peuvent avoir de fortes dimensions.

g) La vitesse des voitures automotrices ne peut être portée bien haut sans qu'on encoure le risque d'un déraillement de trolley, surtout dans les courbes et dans les parties de voies avec appareils spéciaux. Dans les rues, cela est plutôt un bien, mais, considéré au point de vue général, il est clair que la limitation de la vitesse d'un train est un inconvénient

Système par caniveau. — Comme pour le système à conducteur aérien, je continuerai à donner pour les systèmes suivants les divers avantages et inconvénients que la pratique leur a reconnus.

Quand on fait usage d'un caniveau souterrain à double conducteur pour amener l'énergie électrique de son endroit de production à la voiture automotrice, on a comme avantages :

a) La conservation de l'aspect normal des voies; la rainure qui sert de passage à la charrue destinée à recueillir et à ramener le courant sur le double conducteur placé à l'intérieur du caniveau est à peine visible, dans le cas du caniveau sur le côté (en-dessous d'un des rails de roulement), et ne frappe pas désagréablement la vue quand on fait usage du caniveau central (au milieu de la voie du tram). Il faut remarquer, en effet, que cette rainure a des dimensions très restreintes, sa largeur ne dépassant généralement pas 30 millimètres environ, soit la largeur de la gorge d'un rail du genre Broca.

b) Quoique le caniveau ait des dimensions relativement restreintes en largeur et en hauteur, il est cependant possible d'y loger des conducteurs de forte section et éviter

Digitized by Google

ainsi l'emploi de feeders nombreux. N'oublions pas que le prix de ceux-ci, pose comprise, varie, dans le cas du simple trolley, de 5 000 à 15 000 fr. par kilomètre de simple voie. Une économie sur ce poste vaut donc la peine d'être prise en sérieuse considération. D'autre part, l'emploi de conducteurs forts entraîne l'obligation de multiplier considérablement le nombre des points de suspension, pour éviter le maintien d'une flèche trop grande. Or, l'augmentation des points de soutien des conducteurs veut dire diminution de l'isolement kilométrique du réseau, de sorte qu'il y a un juste milieu à garder.

c) Dans le cas de l'emploi du double conducteur, l'un positif, l'autre négatif, il est clair que les effets d'électrolyse peuvent être éliminés entièrement. C'est là un très grand avantage, que les promoteurs du système par caniveau ne peuvent manquer d'exploiter avec profit au détriment des partisans du trolley.

d) Il est clair qu'en adoptant la traction par conducteurs souterrains, on élimine du coup les inconvénients cités à propos du trolley et relatifs à la circulation des véhicules. La rainure étroite n'offre pas de dangers en voie normale, mais si l'on a un caniveau sur le côté, il peut y avoir danger dans les parties de voie à appareils spéciaux, tels que les aiguillages, car, en ces endroits, on est obligé de doubler presque la largeur ordinaire de la rainure, pour pouvoir y loger les aiguilles; dans ces conditions les véhicules à faible bandage risquent de s'enfoncer dans ces cavités. Avec le caniveau central, ce défaut peut être atténué dans une grande mesure.

Les avantages précédents ont paru assez importants à certaines municipalités et autorités communales, pour que le système à caniveau fût imposé au détriment du trolley. Si le premier n'a pas toujours réalisé les espérances qu'on

Digitized by Google

s'était formées à son égard, il est probable qu'il faudra surtout chercher les causes de ce mécompte, non pas dans le principe même du système, mais dans la manière dont il est appliqué. Il ne faut pas oublier que le système à conducteurs souterrains n'a pas derrière lui une aussi longue carrière que le trolley et qu'on n'a pas encore su se rendre un compte exact de l'importance de chaque partie constituante du système.

Celui-ci se trouve encore dans son enfance, comme l'attestent clairement les statistiques que j'ai citées plus haut. L'expérience acquise à son égard est donc encore très limitée, mais tout porte à croire que bientôt ce système arrivera à une perfection suffisante pour qu'il puisse entrer facilement en concurrence avec le système à conducteur aérien. Les désavantages qu'on relève contre le système à caniveau sont d'ordre plutôt économique que mécanique.

a) L'installation du caniveau est généralement compliquée et lente. En moyenne, on ne peut compter que sur un avancement journalier de 80 à 100 m de simple voie. Une circonstance très défavorable à une progression rapide de la construction consiste dans les nombreuses opérations de bétonnage ou de maçonnerie qu'on a à exécuter, dans le manque d'espace, ce qui ne permet pas de concentrer beaucoup d'ouvriers au même endroit, et dans les fréquents déplacements de conduites de toutes natures qu'on rencontre dans la tranchée qui sert à loger le caniveau. Il arrive aussi que le système n'a pas été suffisamment étudié pour pouvoir en faire le montage facilement et rapidement.

Dans son exécution, on se heurte alors à des mécomptes, tels que démontage d'une partie de la voie, puis réajustage, reforage de trous de boulons, etc., etc.

Digitized by Google

On comprend donc qu'il est de toute importance d'étudier le projet d'exécution de manière à rendre celle-ci pratique et facile, et c'est surtout à l'expérience de l'ingénieur-constructeur qu'il s'agit de faire appel.

On conçoit qu'il est impossible de donner une idée, même résumée, des diverses difficultés qu'on peut être appelé à vaincre pendant la construction d'une ligne à traction souterraine, si l'on n'a pas assisté à l'exécution d'un système semblable. Toutefois, il est des principes qui doivent servir de guides à l'ingénieur chargé des travaux, et je me propose d'y fixer l'attention lors de la description de la ligne à conducteurs souterrains récemment établie à Bruxelles en transformation de la traction animale.

b) Il paraît que les coûts d'entretien par voiture-kilomètre d'un caniveau sont sensiblement les mêmes qu'avec le système à trolley, si les conducteurs souterrains ont été bien établis; dans ces frais, on ne comprend pas les réparations de la charrue destinée à recueillir le courant. Ces dernières se sont élevées à Washington (caniveau au milieu de la voie) à environ fr. 0,043 par voiture-kilomètre. Ce chiffre n'a rien d'étonnant si l'on prend en considération les nombreuses fatigues auxquelles la charrue doit résister, principalement en courbe et là où la voie publique présente un fort trafic qui tend à resserrer la rainure et augmenter par conséquent les chances de frottement des flancs de la charrue contre les côtés métalliques formant rainure.

Il est probable que le système à caniveau central donne lieu à moins de frais d'entretien que celui à rainure de côté, car, dans ce dernier, le passage fréquemment répété des lourdes voitures automotrices donne lieu à une fatigue du caniveau plus considérable que dans le premier système.

Digitized by Google

A Buda-Pesth, on arriverait à un ensemble de frais d'entretien de la ligne seule d'environ fr. 0,075 par V-km (voiture-kilomètre). La traction s'y fait par caniveau de côté.

b) Les frais de premier établissement d'un caniveau sont beaucoup plus élevés qu'avec le système à trolley et, quoiqu'il soit certain qu'on puisse les réduire en perfectionnant davantage le système à traction souterraine, il ne paraît cependant guère probable qu'on pourra les diminuer au point de pouvoir rivaliser avantageusement avec le système à trolley. D'autre part, envisager cette question au point de vue exclusif du coût total d'installation, serait erroné. Ce qu'il faut avoir en vue ce sont les coûts comparatifs d'établissement de la traction aérienne et de la traction souterraine pour un nombre donné de voitures par kilomètre ; comme je le montrerai plus loin, les dépenses présentent moins d'écarts à mesure que le trafic augmente, c'est à dire que le nombre de voitures en service par kilomètre devient plus considérable.

A titre de renseignements, il est cependant utile de noter qu'en Angleterre les frais de premier établissement d'une ligne à traction souterraine avec caniveau sous le rail (de côté) et à double conducteur (conducteur d'amenée et conducteur de retour du courant), sont estimés à environ 164 000 fr. par km de simple voie, feeders compris.

A Washington, où l'on a installé le caniveau au milieu avec double conducteur, ces frais se sont élevés à ± 178 500 fr. par km de simple voie ; le placement et la fourniture des feeders sont compris dans ce chiffre.

La ligne de Buda-Pesth a coûté environ 109 000 fr., toujours par km de simple voie avec feeders.

Le système préconisé par la Société d'Études françaises et étrangères qui exploite le brevet Hollroyd-Smith con-

Digitized by Google

sistant dans la construction d'un caniveau avec galerie de visite, reviendrait à 200 000 fr. par km. Celui installé à Bruxelles, sur l'ancienne ligne à traction animale Bois de la Cambre-Schaerbeek, a coûté plus de 100 000 fr. par km de simple voie.

Dans les chiffres précités, il n'est pas tenu compte de tous les frais de réfection de chaussée et de déplacement de conduites de gaz, d'électricité, etc., et dont les totaux peuvent augmenter dans une proportion considérable les coûts indiqués.

Pour ne citer qu'un exemple en Europe, notons que la ligne à caniveau installée à Paris, de la place Cadet à la Porte Montmartre, a absorbé environ 100 000 fr. par km en dépenses supplémentaires Il faut espérer qu'au fur et à mesure de la propagation du système à caniveau, les autorités se décideront à prendre les mesures nécessaires pour que les diverses conduites soient placées de façon à ne nécessiter aucun changement de parcours et de position lors d'une installation de traction souterraine. L'utilité serait aussi grande pour les exploitants de tramways que pour les administrations supérieures et les services publics.

c) Un inconvénient, souvent signalé à propos du caniveau, consiste dans la difficulté de maintenir l'isolement électrique à un degré suffisant. J'ai déjà fait allusion plus haut à la nécessité de faire usage de nombreux points de suspension des conducteurs électriques, afin de diminuer leurs flèches. Si celles-ci sont trop grandes, les contacts entre les prises de courant et les lignes principales laissent à désirer, et il est à craindre qu'aux moments de fortes pluies le courant d'eau dans le caniveau ne produise un court-circuit ; il faut donc maintenir entre le fond du caniveau et les surfaces inférieures des conducteurs principaux un espace suffisant à l'écoulement des plus fortes eaux. Il ne suffit pas de considérer les flèches, quand les

Digitized by Google

conducteurs se trouvent en repos, il faut encore tenir compte de la flexion supplémentaire causée par la pression des palettes de prise de courant sur ceux-ci, pression qui varie entre 4 et 6 kilogrammes.

Une autre cause qui rend nécessaire la multiplicité des points de suspension, principalement dans les courbes, est le fouettement latéral des conducteurs au passage de la prise de courant et l'impossibilité de faire des conducteurs courbes de grande longueur. La disposition adoptée dans les lignes à traction aérienne serait tout à fait impraticable dans ce cas-ci sans rendre la construction des courbes extrêmement difficile et compliquée. De plus, le nombre multiple des suspensions facilite les réparations en cas de défauts des conducteurs logés dans le caniveau. Cet ensemble de circonstances défavorables forcent donc le constructeur à faire usage de nombreux isolateurs, qui peuvent posséder une résistance d'isolement individuelle très considérable, mais dont l'ensemble ne peut manquer de donner lieu à une perte de courant sensible. Celle-ci, en Belgique, ne peut dépasser 1/4 d'ampère par km de voie simple et à la tension de 500 volts, ce qui revient à imposer à la ligne une résistance d'isolement kilométrique de 2 000 ohms.

Un fait curieux a été constaté à Washington sur une ligne à caniveau et à double conducteur. On a remarqué que le conducteur positif possédait une résistance d'isolement 20 à 30 fois plus grande que le conducteur négatif. Ainsi, tandis que le premier accusait au galvanomètre un isolement de 8 000 ohms par mille anglais, le second ne possédait qu'une résistance d'isolement de 400 ohms. J'emprunte ces détails à un article de notre camarade Dawson sur la matière.

Dans ce qui précède, j'ai essayé d'esquisser les bons et les mauvais côtés des deux systèmes en discussion; il me

Digitized by Google

reste à indiquer sommairement les frais d'installation des matériels fixe et roulant auxquels ils donnent lieu.

D'après M. de Marchena, on peut estimer ceux-ci de 36 000 à 40 000 fr. par voiture en service, ce qui concorde avec les derniers renseignements que j'ai su me procurer. Pour plus de facilité, on peut rapporter ces frais au cheval-vapeur installé à l'Usine centrale de production et les fixer entre les limites extrêmes de 80 à 100 chevaux et de 1 000 chevaux et au-dessus, de la manière suivante :

Dépense pour :

Moteurs et chaudières par cheval-vapeur.	fr. 300-150
Matériel électrique, dynamos, tableaux. .	» 250-200
Maçonnerie et bâtiments.	» 250-150
ce qui donne un total de.	fr. 800-500

par cheval-vapeur installé. On voit que le total diminue beaucoup à mesure que la force nécessaire à produire augmente. Ce fait explique, entre autres, l'économie produite par une installation destinée à desservir non seulement un réseau de tramways, mais au surplus à fournir l'énergie électrique pour d'autres usages. Les dépenses précédentes sont applicables aux lignes européennes; en Amérique, elles sont plus élevées, comme il ressort clairement des renseignements que M. Dawson a publiés sur ce sujet. Cet ingénieur fixe comme suit les frais approximatifs d'installation des diverses parties composantes d'une station centrale de production d'énergie électrique.

Dynamo à courant continu, par kw . . .	fr. 150
» à courants triphasés par kw . .	» 175
Installation des machines à vapeur avec chaudières et accessoires :	
Machines à grande vitesse	» 225-275
Machine Corliss	» 325-375

Digitized by Google

Chaudières à retour de flamme horizontales, évaporant 15 kgs d'eau par m² de surface de chauffe; dépense par cheval-vapeur.	fr.	50
Chaudières multitubulaires pour machines à haute pression; dépense par cheval-vapeur.	»	75-100
Chaudières du type Lancashire et à haute pression; par cheval-vapeur	»	90
Machine Corliss avec tuyauterie et fondations; par cheval-vapeur.	»	140
Bâtiment d'usine légèrement construit; par cheval-vapeur	»	25
Pompes d'alimentation et injecteurs; par cheval-vapeur	»	9
Bâtiment d'usine en tôle ondulée; par mètre carré	»	225

Ces chiffres, puisés de source américaine, ne sont évidemment pas applicables aux lignes du Continent où les conditions d'exploitation sont toutes différentes, mais ils permettent de se former une idée des dépenses d'installation du matériel fixe aux Etat-Unis. Ce qui différencie principalement la situation des tramways européens de ceux de l'autre côté de l'Atlantique, ce sont les habitudes du public, l'étendue des exploitations, l'emploi simultané, fréquent de trains à voyageurs et de trains de marchandises, la main d'œuvre plus élevée aux Etats-Unis.

L'estimation de la puissance nécessaire à engendrer à la station centrale d'électricité forme un problème dont la solution exacte est très difficile à atteindre. Les considérations théoriques, auxquelles on pourrait avoir recours, manquent de sanction pratique suffisante, de sorte qu'on est obligé souvent de procéder par comparaison et d'évaluer la puissance requise d'après celle nécessitée sur d'autres lignes semblables.

Digitized by Google

Si la théorie ne parvient pas à fournir des résultats pratiques directs, elle a cependant le grand avantage de permettre à l'ingénieur d'analyser le problème et de se rendre un compte satisfaisant des difficultés qui lui sont présentées au cours de ses recherches. C'est grâce aux principes théoriques qu'il lui sera possible d'établir des comparaisons justes entre les diverses conditions d'exploitation des lignes de transport en général et d'en tirer des conclusions s'approchant de la vérité. En scrutant avec soin les résultats obtenus ailleurs, le constructeur recueillera un ensemble de données précieuses pour le projet qu'il a en vue.

Les calculs relatifs à l'exécution de la puissance nécessaire à l'usine d'électricité ont pour base l'évaluation des résistances opposées au mouvement du train. Celles-ci se résument toutes en frottements de diverses natures. On conçoit donc que la diminution de ceux-ci est de toute nécessité pour l'exploitant de la ligne.

Ces résistances passives ont des valeurs différentes selon que le mouvement se fait en voie droite, sur pente, en courbe, et que l'état de la ligne est plus près de la perfection. Les efforts supplémentaires à vaincre pendant les démarrages sont également à considérer, surtout si les arrêts se font en profil accidenté ou en courbe.

Considérons donc successivement les divers cas qui peuvent se présenter, savoir :

1° La voie est de niveau ou en palier.
2° La voie est en rampe.
3° La voie est en courbe.
4° Le train démarre.

Ce qui complique la question, c'est que les coefficients de traction, c'est-à-dire les efforts nécessaires pour mouvoir l'unité de poids, varient, non seulement avec les cir-

Digitized by Google

constances énumérées ci-dessus, mais qu'on constate des variations de leurs grandeurs respectives suivant :

a) Le tracé du profil de rail et la nature du pavage. On conçoit, en effet, qu'un rail à gorge procurera plus de résistance au roulement qu'une voie du type Vignole, et qu'un pavage fait à fleur de la surface supérieure du bourrelet du rail augmentera la valeur du coefficient de traction, attendu que les bandages des roues viendront frotter sur le pavé. Pour régulariser l'usure, tant des bandages que du rail, on tolère un déplacement transversal des roues de 6 à 8 millimètres et on donne aux bandages une largeur d'environ 75 millimètres. La largeur du bourrelet de rail, assez variable en général, peut s'estimer en moyenne de 40 à 50 millimètres.

Dans les courbes de faible rayon, le rail à gorge peut occasionner un surcroît considérable de frottement, le mentonnet du bandage de la roue venant à toucher les faces latérales de la gorge. Pour éviter cet inconvénient, très pernicieux à la bonne conservation de la voie et des roues, il faut élargir la gorge du rail dans une certaine mesure qu'il est aisé de calculer.

A cet effet, distinguons 2 cas :

1) Les essieux peuvent se placer radialement à tous moments, autrement dit : on fait usage d'un boggie.

Appelons a l'épaisseur du mentonnet,
c la largeur de la gorge,
R le rayon de la courbe.

Pour que le mentonnet ne frotte pas simultanément aux trois points A, B et C contre les faces de la rainure, il suffira de réaliser la condition

$$c > a + d,$$

Digitized by Google

a est une donnée qu'on peut estimer à 20 millimètres, de sorte qu'il suffit d'avoir la grandeur de l'inconnue *d* pour savoir calculer le minimum de $c = a + d$.

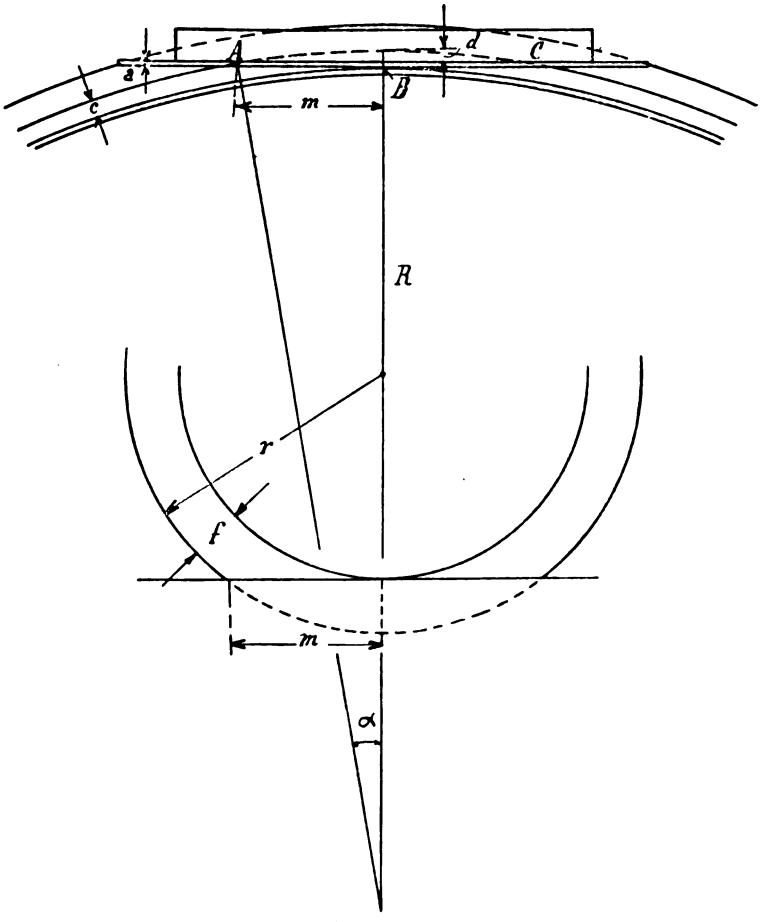


Fig. 1.

La fig. 1 montre que

$$d = R - R \cos \alpha,$$

$$\sin \alpha = \frac{m}{R},$$

Digitized by Google

en vertu de la relation bien connue entre les cosinus et sinus, on arrive facilement à l'équation

$$d = R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{m^2}{R^2}}\right)$$

et finalement on aura

$$c > a + R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{m^2}{R^2}}\right)$$

avec $m = f(2r - f)$.

2) Les essieux conservent une position invariable par rapport à l'ensemble du châssis de la voiture. C'est le cas général en Europe.

Pour éviter le forcement des mentonnets des roues dans la rainure, il faut que l'on ait au moins

$$c = a + e - e'.$$

Désignons par : D l'écartement des essieux,
R le rayon de la courbe,
r le rayon des roues,
f la hauteur du mentonnet,
a la largeur du mentonnet.

On voit facilement (fig. 2) que

$$l^2 = e(2R - e)$$
$$l'^2 = e'(2R' - e')$$
$$l = \frac{D}{2} + \frac{m}{2}$$
$$l' = \frac{D}{2} - \frac{m}{2}$$
$$l' = l - m = l - \frac{1}{2}\sqrt{c(2r - c)}$$
$$c = a + (R + R') - \left\{\sqrt{R^2 - l^2} + \sqrt{R'^2 - l'^2}\right\}$$

Digitized by Google

ou approximativement

$$c = a + 2R - \left(\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} + \frac{m}{2}\right)^2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - \frac{m}{2}\right)^2}\right)$$

Il importe, dans le tracé provisoire d'un profil de rail à gorge, de tenir compte de la facilité d'évacuation des boues qui viendraient obstruer la rainure. En Amérique,

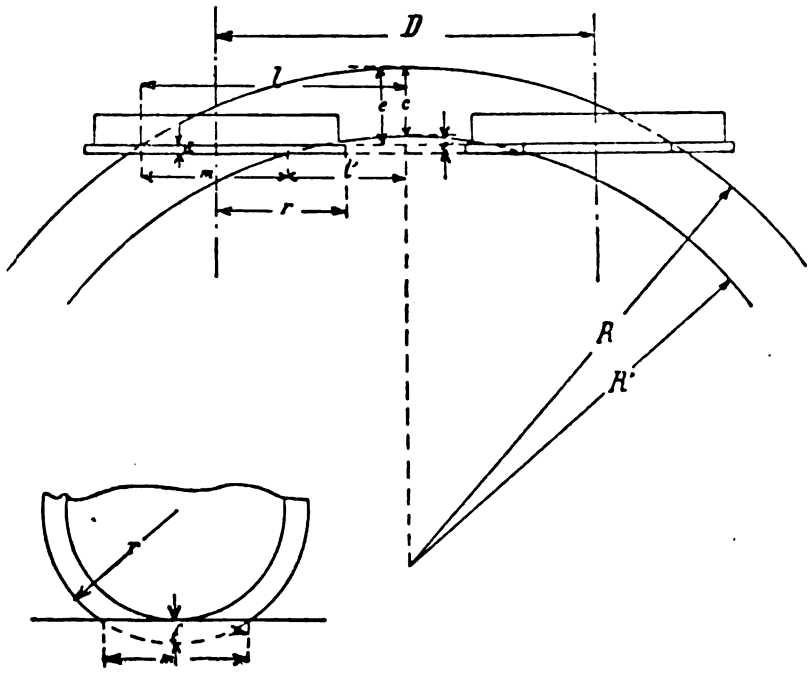


Fig. 2.

où l'on fait usage des types dérivés du genre Broca, on a eu soin de veiller à ce point et l'on a donné à la gorge une forme aplatie très large. Les voies de tramway étant couramment placées sur du ballast directement, il est indis-

Digitized by Google

pensable de bien bourrer celui-ci en-dessous du patin du rail, dont le profil doit se prêter facilement à cette opération.

Pour tenir compte d'une mauvaise exécution du bourrage, il est nécessaire de donner à la voie une rigidité suffisante et une très grande résistance à la flexion en augmentant suffisamment la hauteur du rail. Je ne m'étendrai pas davantage sur ce point, qui fait partie des conditions essentiellement mécaniques auxquelles les rails doivent satisfaire, mais, notons, en passant, que la tendance générale est l'emploi d'une voie lourde; le poids de 30 kgs par mètre courant est souvent atteint et même dépassé. De plus en plus, les ingénieurs se rendent compte des avantages d'une voie lourde, capable d'une grande stabilité. Il ne suffit pas d'améliorer seulement le matériel de roulement, mais il faut que les perfectionnements se portent également sur l'établissement de la surface de roulement, la voie et les véhicules auxquels elle sert de support devant être comme « a man and woman » pour employer l'expression très significative de Stephenson.

b) L'écartement de la voie. Il paraît que les écartements donnent moins de résistance à mesure qu'ils augmentent. Ce résultat tient probablement du fait que les véhicules à faible écartement sont plus sujets à donner lieu à des mouvements de lacet, leur base d'appui offrant moins de stabilité que dans le cas d'écartement plus considérables.

c) La vitesse du train. La résistance totale augmente avec la vitesse ; ce qui peut s'expliquer, d'une part, par l'influence d'une stabilité moins grande, d'autre part, par l'effort résistant croissant opposé au train par l'air. La mesure suivant laquelle ce dernier élément intervient dans

Digitized by Google

l'évaluation de la résistance totale, n'est pas bien déterminée ; les données d'expérience font presque totalement défaut à cet égard. M. Clark donne comme coefficients de traction totaux, variables avec la vitesse, les chiffres suivants :

5,45 kgs par tonne pour une vitesse de 1 600 mètres par heure.

5,9 kgs par tonne pour une vitesse de 16 kilomètres par heure.

6,36 kgs par tonne pour une vitesse de 24 kilomètres par heure.

7,03 kgs par tonne pour une vitesse de 32 kilomètres par heure.

M. de Marchena indique comme moyennes des résistances en voie des types Vignole et Broca sur niveau droit des chiffres différents, selon que le véhicule est automoteur ou remorqué.

	VOITURE AUTOMOTRICE.	VOITURE REMORQUÉE.
Voie Vignole.	8-10 k/p T.	4-6 k/p T.
Voie Broca	13-15 k/p T.	8-10 k/p T.

Les voitures sont à 2 essieux parallèles et pèsent de 6 à 7 tonnes en charge.

La résistance additionnelle causée par le passage du train dans les courbes de faible rayon, peut atteindre 15 à 20 kgs par tonne, selon leur acuité et le genre de rail adopté.

Pour estimer théoriquement la puissance motrice à fournir à un train, on peut considérer successivement la

Digitized by Google

résistance normale en palier, sans courbes ni points d'arrêt, et les résistances additionnelles résultant des efforts de traction supplémentaires nécessités par le passage en courbe, en rampe et les démarrages.

La résistance normale se compose de :

1° La résistance au roulement des roues sur les rails ;

2° La résistance due au frottement des fusées contre leurs coussinets ;

3° La résistance due à la conicité des bandages produisant des glissements des roues sur les rails ;

4° La résistance de l'air due au déplacement des molécules d'air pendant le mouvement du train.

Les efforts résistants 1° et 3° sont appliqués aux jantes des roues ; 2° ont leurs points d'application sur les fusées des essieux et 4° ont leurs points d'action combinés au centre du front du train.

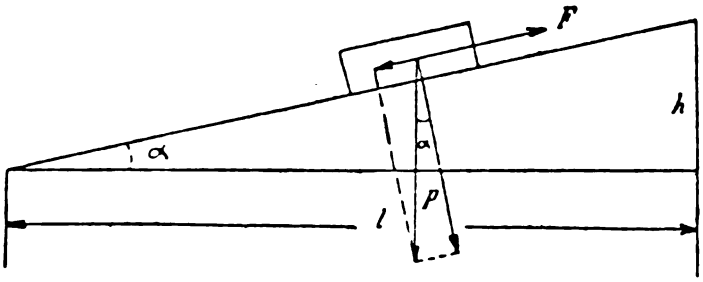


Fig. 3.

Les résistances additionnelles proviennent :

1° Des rampes. En appelant P tonnes la charge à remorquer sur une rampe d'inclinaison α et de longueur horizontale *l* mètres, *h* mètres la différence des niveaux à la

Digitized by Google

naissance et à l'extrémité de la rampe, on voit que l'effort de traction à développer est en tonnes (fig. 3).

$$F = P \sin \alpha + P \cos \alpha \times f,$$

f étant le coefficient de frottement de roulement.

En raison de la petitesse de l'angle α, on peut poser très approximativement

$$\cos \alpha \overset{\infty}{=} 1$$

$$\sin \alpha \overset{\infty}{=} \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l}$$

par conséquent

$$1\,000\ F\ \text{kgs} = P tg \alpha \times 1\,000\ \text{kgs} + Pf \times 1\,000\ \text{kgs}.$$

Or, $\operatorname{tg} \alpha \times 1\,000$ représente la pente en millimètres par mètre, ce que nous désignerons par i ; en exprimant ensuite F en kgs et P en tonnes, on a pour l'effort résistant en kgs par T, l'expression finale

$$F^K\ P^T\ i + P^T f.$$

On remarque donc que la résistance additionnelle créée par le passage en rampe est représentée par le produit du nombre des tonnes par la pente en millimètres par mètre, soit Pi.

2° Des courbes. Les courbes procurent une résistance supplémentaire provenant d'une part de la solidarité des roues calées sur le même essieu, d'autre part, du parallélisme des axes. La première cause produit le glissement d'une des roues solidaires, pendant que l'autre continue son mouvement de rotation sur le rail conjugué.

Digitized by Google

Les essieux parallèles créent également un glissement, dont la valeur augmente avec l'écartement des axes des roues.

Par des considérations théoriques, on arrive à résumer la résistance additionnelle due aux courbes dans la formule suivante :

$$R = \frac{Pf}{2r}\left(e + \sqrt{e^2 + l^2}\right),$$

dans laquelle R est la résistance en kg.,

P la pression en tonnes exercée par le bandage d'une roue sur le rail,

f le frottement de glissement en kgs par tonne,

r le rayon de la courbe en mètres,

e l'écartement de la voie en mètres,

l l'écartement des essieux en mètres.

3° Des démarrages. L'évaluation des forces nécessaires à la mise en mouvement d'une masse pesant P tonnes, primitivement au repos et devant être animée d'une vitesse V mètres par seconde au bout de t secondes, ne peut être qu'approximative, attendu que la loi des variations des efforts moteurs est variable. Pour simplifier, admettons que la force motrice reste constante en grandeur ; la masse à laquelle elle est appliquée prendra un mouvement qui se rapprochera du mouvement uniformément accéléré, par conséquent, la loi des espaces parcourus sera très sensiblement représentée par une parabole, dont l'axe principale sera la perpendiculaire élevée au point de départ A sur la direction du mouvement AB.

Appelons P le poids total en tonnes,

R_o la résistance primitive au repos, exprimée en kgs par tonne,

Digitized by Google

R la résistance pendant le mouvement en kgs par tonne,

F_0 l'effort de démarrage en kgs,

V la vitesse en mètres à atteindre au bout d'un temps *t* secondes,

AB représente sur le diagramme la direction à imprimer à la masse de poids P^T,

AD mesure l'effort F_0 développé à la mise en mouvement,

AF figure la grandeur R_0 et BE représente R. La courbe EF est donc la représentation graphique des efforts développés pendant les *t* secondes, durée du démarrage et la surface ABEF sert de mesure aux travaux résistants, tandis que ABCD figure les travaux moteurs

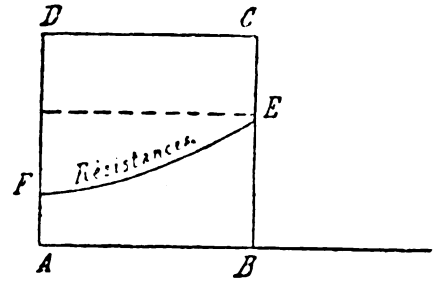


Fig. 4.

appliqués au poids P tonnes. La différence des deux surfaces précédentes, soit CDFE est la mesure du travail emmagasiné pendant la mise en mouvement. En vertu des propriétés bien connues de la parabole, on a, par conséquent (fig. 4)

$$1\,000\,\frac{P}{g}\,\frac{V^2}{2} = (F_0 - R)\,\frac{Vt}{2} + \frac{2}{3}\,(R - R_0)\,\frac{Vt}{2},$$

Digitized by Google

d'où l'on tire aisément

$$F_0 = \frac{R + 2R_0}{3} + 1\,000\,\frac{P}{g}\,\frac{V}{t}$$

pour l'expression de l'effort total à développer au moment du démarrage.

4° De l'imperfection de la voie. Il faut comprendre dans cette catégorie de résistances additionnelles, les efforts supplémentaires dus aux passages des éclisses, le frottement causé par la flexion des rails, etc., etc.

On peut exprimer ces diverses résistances par la formule θ P V, θ étant un coefficient variable dans chaque cas considéré.

Les considérations théoriques montrent à l'évidence qu'il est bien difficile d'arriver à des évaluations de puissance satisfaisantes, en présence des variables f et θ et en raison des simplifications qu'on est obligé d'appliquer aux calculs dans le but de rendre ceux-ci pratiques.

On en arrive donc à devoir recourir aux résultats obtenus dans des exploitations similaires ; il est possible d'arriver à une approximation satisfaisante en comptant sur une dépense de 0,620 à 0,650 kilowatt-heure par voiture-kilomètre pour une voiture automotrice ; dans le cas d'un train composé d'un véhicule moteur et d'un ou de plusieurs véhicules remorqués, il faut majorer les chiffres précédents d'un tiers pour chaque voiture remorquée. Le poids de la voiture automotrice est estimé à 10 tonnes en charge, et celui de l'autre 5 à 6 tonnes. Ce qui donne un appui à l'exactitude satisfaisante que procurent les puissances nécessaires indiquées est un tableau dû au professeur Mangarini, fournissant les indications sur les dépenses d'énergie électrique occasionnées par un service de 1 à 10 voitures sur une ligne possédant des

Digitized by Google

rampes de 100m/m par mètre et des courbes minimum de 16 mètres ; la vitesse a été de ± 10 km par heure pendant les essais. Voici les résultats de ceux-ci :

NOMBRE DES VOITURES EN SERVICE.	PUISSANCE ABSORBÉE EN KWH PAR VKM.
1	1,358
2	0,985
3	0,686
4	0,695
6	0,714
7	0,664
8	0,643
9	0,650

L'expérience ayant démontré que les systèmes par conducteur aérien et par conducteurs souterrains nécessitent pour un même service les mêmes dépenses d'énergie, il s'en suit que les frais d'installation complète de ces deux systèmes rapportés au nombre de voitures en service par kilomètre de voie simple, diminuent à mesure que cette dernière quantité augmente, c'est-à-dire à mesure que le trafic devient plus intense. En même temps les écarts des dépenses de premier établissement, considérables si on les rapporte au kilomètre de voie, diminuent très sensiblement, comme on peut s'en assurer par l'inspection du tableau ci-dessous. On y a estimé les dépenses d'installation matériel fixe et roulant à 38 000 fr. par voiture en service ; l'établissement de la voie est estimé à 25 000 fr. par km pour la ligne à trolley et à 100 000 fr. par km pour le système à caniveau. Les feeders, pose comprise, sont

Digitized by Google

TABLEAU indiquant les dépenses de premier établissement des systèmes à trolley et à caniveau, rapportées au nombre des voitures en service par kilomètre de simple voie.

	MATÉRIEL FIXE ET ROULANT.	FEEDERS.	INSTALLATION DE LA VOIE					
			1 VOITURE PAR KM.	2 VOITURES PAR KM.	3 VOITURES PAR KM.	4 VOITURES PAR KM.	5 VOITURES PAR KM.	6 VOITURES PAR KM.
Système à trolley.	38 000 fr.	5 000 fr. 12 500 »	25 000 fr.	12 500 fr.	8 330 fr.	6 250 fr.	5 000 fr.	4 166 fr.
Système à caniveau.	38 000 »	5 000 » 12 500 »	100 000 »	50 000 »	33 330 »	25 000 »	20 000 »	16 666 »
Total des Dépenses : Système à trolley. .			68 000 fr.	55 500 fr.	51 330 fr.	57 000 fr.	55 500 fr.	54 666 fr.
Système à caniveau.			143 000 »	93 000 »	76 330 »	75 500 »	70 500 »	67 166 »

Digitized by Google

évalués à 5 000 fr. par km pour un service allant jusqu'à 4 voitures par km et à 12 500 fr. par km pour un trafic plus intense.

J'ai admis, dans ce qui précède, que les frais d'établissement des feeders, pose comprise, s'élèvent à 5 000 francs environ par kilomètre de simple voie, pour un faible trafic. C'est la dépense proportionnelle occasionnée par l'installation des tramways électriques du Havre. Si l'on considère le cas d'un trafic plus intense, il faut majorer considérablement le chiffre que je viens de citer, car on sait que la perte de tension varie en proportion directe du carré du courant absorbé, soit donc proportionnellement à la deuxième puissance du nombre des voitures en service. En moyenne, on peut estimer le coût des feeders et de leur placement 10 000 à 15 000 francs pour un trafic de plus de 4 voitures par kilomètre. Il est possible que pour un service de 6 voitures par kilomètre, l'évaluation moyenne de 12 500 francs ne suffise pas et qu'il faille augmenter quelque peu les chiffres de la dernière colonne du tableau précédent; de même on pourrait compter, pour un service de 4 voitures, sur une dépense totale légèrement moindre. Les frais indiqués n'ont évidemment pas de valeurs absolues; c'est à l'ingénieur à les fixer plus exactement dans chaque cas particulier qui lui serait soumis.

Les avantages auxquels donne lieu l'exploitation des lignes de tramway par l'un des deux systèmes précédents sont de nature purement commerciale, d'une part, et se rangent sous la rubrique traction, d'autre part. D'abord, il est admis que le système à caniveau, quoique de création plus récente, donne lieu, comme son congénère à trolley, à des frais d'exploitation moins élevés que les autres modes de traction par l'électricité; il faut peut-être en excepter les systèmes d'Hanovre et de Dresde. L'expé-

Digitized by Google

rience et le peu de développement de ceux-ci ne permettent pas de se prononcer exactement sur ce point.

Au point de vue du service de la traction, les systèmes à conducteur aérien et à conducteurs souterrains permettent une grande souplesse dans le trafic. Celui-ci peut être modifié facilement sans occasionner des dépenses notables. C'est d'ailleurs le cas de tous les modes de transformation d'énergie empruntant la force à une origine commune.

Alors que le système par accumulateurs oblige à l'achat de voitures automotrices et de matériel très-coûteux et à une transformation du service à l'usine centrale, si l'on désire augmenter le trafic, les deux systèmes en question ne nécessitent que quelques véhicules moteurs en plus.

L'usine centrale, en effet, est toujours proportionnée de façon à permettre une augmentation de service; sa conduite mécanique n'est guère affectée par cette circonstance, s'il s'agit des systèmes à trolley et à caniveau, tandis qu'il n'en est pas de même dans le cas d'accumulateurs devant être chargés à des intervalles de temps régulièrement espacés.

De plus, dans les deux modes de traction que nous considérons, le poids utile transporté atteint une proportion à laquelle il n'est pas possible d'arriver avec le système à accumulateurs. Ce point, très-capital au point de vue des résultats d'exploitation, place ce dernier dans une infériorité très-marquée par rapport aux deux autres, dans lesquels les poids utiles remorqués varient de $^1/_5$ à $^1/_3$ environ des poids totaux.

En ce qui concerne les frais d'amortissement des capitaux de premier établissement, il est probable que le système à caniveau donnera, comme celui à trolley, des résultats plus favorables que les autres. Cette considération a son importance au point de vue de l'évaluation du

Digitized by Google

coût d'exploitation kilométrique probable de la ligne projetée. On trouvera plus loin un tableau résumant les taux d'amortissement des diverses parties d'une installation de tramway électrique. Les pourcentages indiqués ne sont que des moyennes généralement admises et variables selon chaque cas particulier.

Malheureusement, le trolley ainsi que le caniveau donnent lieu, de par leurs principes d'établissement, à une dépendance complète de l'usine centrale et de la ligne dont les dérangements peuvent occasionner de graves perturbations dans le service et modifier très-défavorablement les recettes.

Aux points de terminaison, les manœuvres sont généralement difficiles et coûteuses, parce que les voitures sont souvent obligées d'interrompre les contacts avec les conducteurs d'énergie électrique. Il en est de même dans les garages. Les véhicules, dans lesquels l'énergie se trouve accumulée sous une forme quelconque, n'offrent pas cet inconvénient et possèdent donc une certaine supériorité à ce point de vue.

Système par accumulateurs. — Au lieu de fournir aux voitures automotrices l'énergie électrique nécessaire à leur propulsion au moyen de conducteurs longeant la voie et servant d'intermédiaire entre le lieu de production d'électricité et son endroit d'utilisation, on peut accumuler cette énergie dans les voitures même par l'emploi des accumulateurs. Cette manière de procéder offre l'avantage de rendre l'usine et la ligne indépendantes l'une de l'autre. Un accident survenu à l'une de ces deux parties ne nuit pas directement au bon fonctionnement de l'ensemble. Par la suppression même des liaisons électriques entre les voitures et le lieu de production d'énergie, il y a absence de tout obstacle sur la voie publique qui

Digitized by Google

ne se trouvera plus être déparée par des fils, poteaux, etc., et qui sera moins sujette à des réparations fréquentes. De plus, le mode d'utilisation de l'électricité engendrée à la station centrale permet de produire celle-ci d'une façon régulière et de retirer un rendement plus considérable des moyens de production. On voit donc que le système par accumulateurs est capable de satisfaire à bien des exigences, que les autres modes de traction précédemment considérés ne sauraient remplir. Il possède donc sur ceux-ci des avantages certains, mais qui, malheureusement, s'effacent souvent devant les inconvénients graves auxquels il donne lieu et parmi lesquels il convient de citer principalement le poids mort considérable des voitures motrices. Le poids utile, en effet, n'atteint que $^1/_6$ à $^1/_5$ du poids total environ.

Cette circonstance rend le passage des rampes très difficile, comme il est facile de voir par la formule donnée plus haut : $F = P(i + f)$.

Ensuite, l'emploi des accumulateurs est peu approprié à un service irrégulier provenant d'un trafic essentiellement variable, comme il a été expliqué précédemment.

En dehors de ces inconvénients, il en est surtout un qui a retardé la généralisation du système que nous considérons actuellement. S'il est vrai que son emploi permet une meilleure utilisation des organes de l'usine centrale de production de l'énergie électrique, il ne faut pas perdre de vue que le fonctionnement de l'ensemble de tout le système abaisse le rendement global au point de le rendre inférieur à ceux des systèmes à trolley et à caniveau, et cela parce que les accumulateurs ne sont capables de rendre que 70 % environ de la puissance fournie et que le poids mort à mouvoir est plus considérable. Au point de vue financier, il faut encore tenir compte des dépenses supplémentaires occasionnées par les frais d'entretien, de

Digitized by Google

surveillance et de manutention des accumulateurs. Ceux-ci, au surplus, donnent lieu, jusque maintenant du moins, à des taux d'amortissement élevés, surtout si le régime auquel ils sont soumis est relativement dur. Tel serait le cas d'une ligne à arrêts fréquents et fixés en des points défavorables : commencement de rampes, entrée en courbe, etc.

La General Electric Company, qui a fait de nombreux essais sur les dépenses d'énergie nécessaires au démarrage, préconise l'emploi d'un contrôleur dit séries-parallèle, qui donnerait une économie de près de 30 % sur le rhéostat généralement employé aux débuts de la traction électrique. Le diagramme indiqué par la fig. 5 et

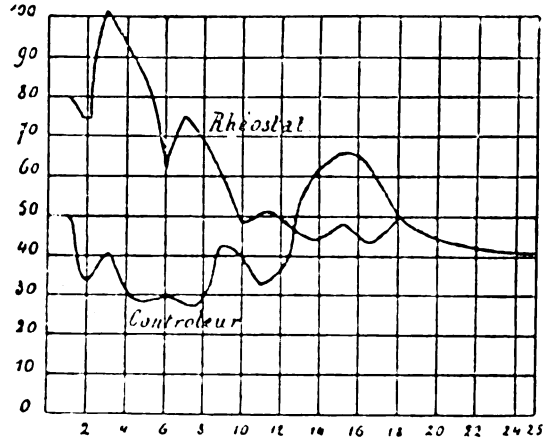


Fig. 5. — Abs : temps par seconde ; ord : courant en ampères. Comparaison entre les variations de courant dans les cas d'un rhéostat de démarrage et d'un controleur-série-parallèle. La voiture pesant 6 300 kgs est munie de deux moteurs G. E 800.

emprunté à un article du camarade Dawson, permet de juger des avantages du rhéostat combiné sur l'ordinaire. Malgré l'abaissement considérable du courant initial qui,

Digitized by Google

avec le rhéostat combiné, n'est que de 50 ampères contre 80 ampères donnés par le rhéostat ordinaire, il convient de remarquer que, même l'emploi du premier, occasionne le passage de courants dépassant de 50 % le courant normal (voir l'ordonnée entre les abscisses 14″ et 16″). Les accumulateurs, soumis fréquemment à des variations aussi notables et brusques, ne manqueraient évidemment pas de se détruire très rapidement. Cette considération limite encore leur emploi comme moyens de propulsion.

A Paris, où l'on a eu l'occasion d'utiliser tous les modes de traction, on estime que les frais d'exploitation sont

pour la traction	animale	0,562	fr. par V-km.
»	» par accumulateurs	0,542	» »
et »	» par trolley	0,30	» »

Il est probable que le système souterrain, dans les mêmes conditions, eût donné comme ensemble de frais d'exploitation 0,40 à 0,42 francs par V-km.

Les accumulateurs fournissent donc, après la traction par chevaux, le total le plus élevé. Ce qui augmente ce chiffre dans une forte proportion, ce sont les frais de manutention, qui s'élèvent jusqu'à 0,25 fr. environ par V-km et peuvent même dépasser cette somme.

Dans une récente communication, M. Uppenborn émet les considérations suivantes :

Les frais d'installation d'une ligne aérienne à simple voie reviennent à 18 500 francs par km, et pour la double voie à 27 000 francs.

Une batterie d'accumulateurs coûte 3 750 francs ; donc, à dépenses égales, on peut installer cinq batteries d'accumulateurs par kilomètre de ligne à trolley à simple voie et sept batteries par kilomètre de ligne à trolley à double voie. Il est clair que M. Uppenborn fait abstraction des frais d'installation de la voie qui, toutes choses égales

Digitized by Google

d'ailleurs, doit être plus solidement construite pour le passage des lourdes voitures à accumulateurs pesant en moyenne 15 tonnes, que pour la ligne à trolley, où les véhicules moteurs ont rarement des poids dépassant 10 à 12 tonnes.

Le prix de 3 750 francs par batterie, paraît, à première vue, peu élevé. Sur la ligne parisienne Saint-Denis-Place de la Madeleine, le coût d'achat moyen a été de 4 610 fr. par batterie et la dépense d'installation totale, comprenant le matériel fixe (usine, dynamos, etc.) et le matériel roulant, est revenu à 60 000 francs par voiture en service.

D'après M. Uppenborn, la traction par accumulateurs peut parfaitement entrer en concurrence avec le système à trolley et l'exploitation sera d'autant plus avantageuse que les intervalles entre deux voitures qui se suivent sont plus grands et que la marche est moins souvent interrompue.

L'exploitation par le système à accumulateurs perd ses avantages si la ligne comporte de longues rampes de 2 à 3 % (*Industrie électrique* du 25 avril 1897). Ceci confirme entièrement les conclusions auxquelles nous sommes arrivés ci-dessus. En ce qui concerne les frais d'exploitation totaux, comprenant les dépenses de production de force motrice, celles d'entretien du matériel, de manutention, etc., ils se sont élevés :

A Paris.	à fr.	0,542	par voiture-kilomètre.
A Birmingham . .	»	0,473	» »
A La Haye (frais de manutention et d'entien des accumulateurs seuls	»	0,675	» »

Ces chiffres dépassent de beaucoup les moyennes admises pour le système à trolley, sur lequel les accumulateurs ont, d'autre part, l'avantage d'éviter complètement les effets d'électrolyse.

Digitized by Google

Le taux très-élevé des frais de manutention peut causer quelque étonnement, mais remarquons que les transbordements des batteries d'accumulateurs à l'usine centrale exigent des constructions spéciales très-coûteuses, telles que : monte-charges, banquettes de chargement, voies de transport, etc., et que la mise en place des batteries nécessitent des soins spéciaux pour éviter de fausses connexions.

A Paris, on a simplifié cette opération en produisant des contacts automatiques, lors de l'introduction des accumulateurs dans les voitures. A New-York, on a imité ce système, qui semble donner satisfaction.

L'expérience a prouvé qu'il était avantageux de placer les accumulateurs, non pas dans la caisse de la voiture, mais dans le truc ou chassis, pour les soustraire aux oscillations multiples des ressorts. Les trépidations brusques communiquées ainsi sont favorables au dégagement des gaz qui tendent à se fixer sur les éléments et qu'il est utile d'évacuer en établissant un courant d'air au-dessus des batteries.

Au lieu d'employer les accumulateurs directement comme mode de traction, on peut encore les utiliser, dans les stations centrales de tramways, comme modérateurs et régulateurs d'énergie. Ils n'interviennent, dans ce cas, que comme forces auxiliaires aux moments des fortes consommations. Quand le trafic est faible, on en profite pour charger les accumulateurs.

Ce système, qui dérive du système mixte utilisé en éclairage, a donné de bons résultats; il est actuellement utilisé à Zurich; on présume que l'emploi de batteries d'accumulateurs comme auxiliaires peut surtout être avantageux dans le cas d'un profil accidenté et d'arrêts multiples.

Digitized by Google

Système mixte. — Sous cette dénomination, on comprend généralement une combinaison du système à trolley et de celui à accumulateurs, telle qu'elle a été conçue à Hanovre. L'administration supérieure s'était refusée à accorder, à la Société des tramways, l'autorisation de changer le réseau à traction animale en lignes à trolley à l'intérieur de la ville; toutefois, elle s'était montrée favorable à l'emploi des accumulateurs sur le réseau urbain. La Société des tramways s'efforçant de retirer les plus grands bénéfices possibles, compatibles avec les conditions qui lui étaient imposées, adopta la traction par accumulateurs dans la ville et le système à conducteur aérien sur les lignes suburbaines, et ce, à sa grande satisfaction; on peut, en effet, estimer le rendement du système mixte à 80 % environ.

La ligne de Halle, d'une longueur de 7 700 mètres, avec pentes de 25 à 48 m/m par mètre, a donné les frais d'exploitation et les recettes ci-après :

	Traction animale.	Traction mixte électrique.
Nombre des voitures-kilomètres.	755,520	799,444
Dépenses totales par »	21,67 pfennigs.	15,35 pfennigs.
Recettes par »	20,83 »	25,10 »

Là où la Société des tramways se trouvait travailler avec perte, lors de la traction animale, elle a vu ses bilans clôturés avec de forts bénéfices après l'adoption de la traction électrique. Celle-ci, non-seulement, a réduit les dépenses kilométriques dans une grande proportion, mais a fait augmenter le nombre annuel des voitures-kilomètres; les recettes de 20,85 pfennigs recueillies quand la

Digitized by Google

traction se faisait par chevaux, ont subi une augmentation de près de 25 % avec la traction électrique.

Système par contact. — De nombreux inventeurs, désirant réaliser un mode de traction possédant les avantages des systèmes à trolley et à caniveau sans en avoir les inconvénients, ont cru ainsi réaliser les desiderata qu'ils s'étaient imposés en imaginant le système par contacts successifs, dans lequel les voitures motrices prennent l'énergie nécessaire à leur mouvement à des points d'alimentation placés de distance en distance le long de la voie et à fleur du sol.

Parmi les applications industrielles de ce système, il convient de citer une ligne parisienne établie d'après le système Claret-Vuilleumier. Les renseignements concernant le fonctionnement de ce système sont très-vagues et ne permettent pas de se prononcer sur sa valeur pratique. Il paraît cependant très-probable que l'isolement d'une ligne semblable est peu satisfaisant et que le fonctionnement mécanique laisse à désirer. Les réparations paraissent être fréquentes, d'après ce que j'ai pu constater personnellement; il y aura encore beaucoup à perfectionner avant d'arriver à des résultats économiques, tant au point de vue de l'établissement qu'au point de vue de l'exploitation.

Notons, en passant, que l'installation du système Claret-Vuilleumier a nécessité une dépense d'environ 140 000 francs par kilomètre.

La Compagnie Westinghouse a récemment proposé un perfectionnement à son ancien système par contact : elle n'utilise les contacts superficiels que dans les rampes; dans les pentes et en palier, les voitures motrices font usage des accumulateurs dont elles sont munies. C'est un genre de système mixte, dans lequel le trolley est remplacé par le contact superficiel.

Digitized by Google

Par l'aperçu des divers systèmes que nous venons de passer en revue, on voit donc, qu'en ce moment du moins, les systèmes à trolley et à caniveau se font le plus de concurrence. Il parait probable que le mode de traction souterraine sera, d'ici à peu de temps, appelé à se propager davantage; son extension rapide sera évidemment subordonnée aux nombreux perfectionnements qu'on se trouvera être appelé à lui appliquer. J'insisterai plus amplement sur ce point en discutant l'établissement de la ligne à caniveau Bois de la Cambre-Schaerbeek, récemment installée à Bruxelles; mais avant de passer à un examen attentif de ce système, il est utile de donner quelques indications sur l'installation des stations centrales de production de l'énergie. *(Applaudissements.)*

(La suite de cette communication paraîtra au prochain fascicule.)

La discussion de cette note est ajournée jusqu'après publication au *Bulletin*.

La séance est levée à midi et demi.

Digitized by Google

SÉANCE DU 30 MAI 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. André, Andrews, Asbjörnsen, Bayet, Berlow, Bertholet, Briffaux, Caldarera, Cassa, Cheftel, Compijn, Coops-Busgers, De Bast, Decroës, Della Giusta, Delmonte, Del Proposto, de Luboradzki, De Metz, de Muyser, de Sauteiron, Duchesne, Feron, Gérard, Goldschmidt, Herard, Hyde, Jacques, Jovignot, Kniphorst, Kroll, Maus, Moriondi, Nicolini, Nuzzaci, Peltzer, Pirard, Polain, Somerhausen, Sweginski, Tcherniak, Theunis, Van Dooren, Van Musschenbroek, Van Rijn, Viscidi, Walch, Weker, Wilmet.

M. De Bast, *président,* donne lecture d'un télégramme de la maison du Roi des Belges par lequel S. M. remercie l'Association du toast qui lui a été porté au banquet.

Il fait part aussi de la lettre par laquelle le Secrétaire-Général, en voyage, prie l'assemblée d'excuser son absence.

Il invite enfin M. de Sauteiron à communiquer à l'assemblée la lettre de remercîments du Comité de la manifestation Ferraris, en réponse à la souscription de l'Association.

Digitized by Google

M. De Bast, poursuivant l'étude commencée dans son adresse inaugurale, expose la note suivante :

Éléments du calcul des générateurs électriques à courants alternatifs.

ALTERNATEURS MONOPHASÉS.

(Suite.)*

Relation entre les valeurs efficaces de la force électromotrice induite, de la chute de potentiel intérieure et de la différence de potentiel aux bornes de l'induit.— Désignons par E_{eff}, $\mathfrak{E}_{rr}$ et V_{eff} respectivement les valeurs efficaces de la force électromotrice induite développée par l'armature d'un alternateur, de la chute de potentiel dans l'enroulement induit et de la différence de potentiel disponible aux bornes. La première de ces expressions numériques n'est pas égale à la somme des deux autres, car les variations des grandeurs considérées suivent des lois périodiques dont les phases ne sont pas en concordance.

Soient E et V les valeurs instantanées de la force électromotrice induite et de la différence de potentiel aux bornes, I celle de l'intensité du courant débité par l'armature. $\mathfrak{L}$ et R représentant le coefficient de self-induction et la résistance réelle de l'induit, l'égalité suivante est satisfaite à chaque instant

$$E = V + IR + \frac{d}{dt}(\mathfrak{L}I).$$

* Voir tome VIII, 2e série, page 35.

Digitized by Google

Supposons le coefficient de self-induction £ constant et admettons qu'on ait affaire à des fonctions périodiques du temps simplement sinusoïdales, T étant la période de leurs variations.

Posons, en conséquence, $I = I_{max} \sin \alpha$, en rapportant les variations du courant à celles d'un angle fictif dont la valeur dans le cercle trigonométrique est égale, au temps t, à $\frac{2\pi}{T} t$. Au même instant, la différence de potentiel aux bornes a pour expression

$$V = V_{max} \sin (\alpha \pm \varphi),$$

si l'on représente par φ l'angle $\frac{2\pi}{T} \theta$ correspondant au retard ou à l'avance θ de la phase du courant sur celle de la différence de potentiel. Cet angle dépend de la nature du circuit d'utilisation; nous lui attribuerons le signe + pour considérer le cas ordinaire, dans les applications, d'un retard de la phase du courant. $\varphi = o$, et le courant est en concordance de phase avec la différence de potentiel utile quand l'alternateur est en service sur une résistance non inductive et sans capacité.

La valeur simultanée de la force électromotrice de self-induction de l'armature $-\frac{d}{dt}(\mathcal{L}I)$ est

$$-\mathcal{L} I_{max} \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{T} \mathcal{L} I_{max} \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right).$$

On voit que l'amplitude de cette force électromotrice est $\frac{2\pi}{T} \mathcal{L} I_{max}$ et que sa phase retarde sur celle du courant d'un quart de période, mesuré dans le cercle trigonométrique par un angle droit.

Digitized by Google

L'expression de la force électromotrice induite devient, dans ces conditions,

$$E = V_{max} \sin (\alpha + \varphi) + I_{max} R \sin \alpha - \frac{2\pi}{T} \mathfrak{L} I_{max} \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)$$

La somme des deux derniers termes du second membre, égale à la différence entre la force électromotrice induite et la différence de potentiel aux bornes, figure la chute de tension à l'intérieur de l'armature au moment considéré.

A partir d'un point O (fig. 26), menons un vecteur OA proportionnel à $I_{max} R$, valeur maxima de la tension absorbée par la résistance réelle de l'enroulement induit, et incliné d'un angle α quelconque sur une direction arbitraire OX. Traçons ensuite deux autres vecteurs OB et OC, respectivement proportionnels à V_{max} et à $\frac{2\pi}{T} \mathfrak{L} I_{max}$ et faisant avec le vecteur OA des angles égaux à ceux qui correspondent dans le cercle trigonométrique aux décalages de la différence de potentiel aux bornes et de la force électromotrice de self-induction par rapport au courant.

Il est aisé de reconnaître que les projections O*a*, O*b* et O*c* des trois vecteurs sur la droite OY normale à OX figurent, en grandeur et en signe, les valeurs que possèdent au temps $t = \frac{\alpha}{2\pi} T$ les quantités dont ces vecteurs représentent les amplitudes en grandeur et en phase. Il en résulte, d'après l'expression même de E, que, si par l'extrémité de OB, on mène un vecteur BD égal et parallèle à OA, puis par D un vecteur DF égal et parallèle à OC, mais orienté en sens inverse, la projection O*f* de la ligne brisée OBDF sur la direction OY fait connaître la valeur de la force électromotrice induite, au même temps *t*, tandis que *bf* donne celle de la chute de tension dans l'armature.

Digitized by Google

Puisque la somme algébrique des projections des éléments composants d'un système de vecteurs est égale à la projection du vecteur résultant, OF et BF figurent les

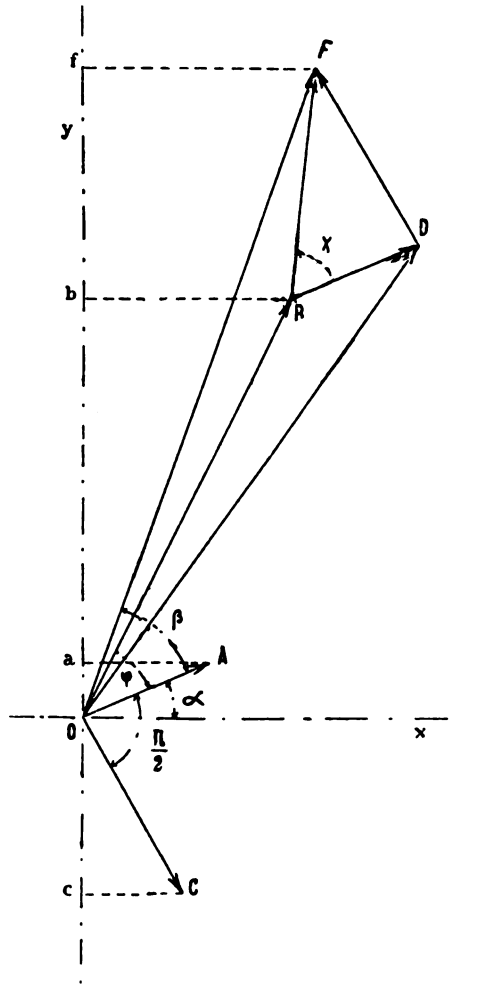


Fig. 26.

Digitized by Google

valeurs maxima, E_{max} et $\mathcal{E}_{max}$, de la force électromotrice induite et de la chute de tension intérieure, dont les phases sont en avance sur celle du courant de temps correspondant respectivement aux angles β et γ.

Pour la même raison, le vecteur OD détermine l'amplitude et la phase de la force électromotrice effective.

Il est à remarquer que, moyennant un simple changement d'échelle pour la mesure des vecteurs, ceux-ci peuvent représenter indifféremment, dans le diagramme de la fig. 26, les valeurs maxima ou les valeurs efficaces des quantités correspondantes, les variations de celles-ci étant toutes simplement sinusoïdales. On sait que le rapport de la valeur maxima à la valeur efficace d'une fonction périodique simple est égal à $\sqrt{2}$.

Cela étant, la considération du triangle rectangle BDF conduit à la relation

$$\left[\mathcal{E}_{eff}\right]^2 = \left[I_{eff}\,R\right]^2 + \left[\frac{2\pi}{T}\mathfrak{L}\,I_{eff}\right]^2,$$

qui, mise sous la forme suivante,

$$\mathcal{E}_{eff} = I_{eff}\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2}\mathfrak{L}^2} \qquad (2)$$

rappelle ce résultat connu, que la chute de tension efficace à l'intérieur de l'armature est égale au produit du courant efficace par la résistance apparente ou impédance de l'enroulement induit.

D'autre part, en projetant les trois côtés du triangle OBF successivement sur la direction OA et sur une direction perpendiculaire à celle-ci, il vient

$$E_{eff}\cos\beta = V_{eff}\cos\varphi + \mathcal{E}_{eff}\cos\gamma,$$
$$E_{eff}\sin\beta = V_{eff}\sin\varphi + \mathcal{E}_{eff}\sin\gamma;$$

Digitized by Google

d'où l'on tire, par l'addition membre à membre des deux équations élevées au carré,

$$E^2_{eff} = V^2_{eff} + \mathcal{E}^2_{eff} + 2\, V_{eff}\, \mathcal{E}_{eff} (\cos\varphi \cos\gamma + \sin\varphi \sin\gamma).$$

Mais

$$\cos\gamma = \frac{I_{eff}\, R}{\mathcal{E}_{eff}} \text{ et } \sin\gamma = \sqrt{1 - \cos^2\gamma} = \frac{1}{\mathcal{E}_{eff}} \sqrt{\mathcal{E}^2_{eff} - I^2_{eff}\, R^2}$$

En substituant ces valeurs dans l'équation précédente, on trouve enfin

$$E^2_{eff} = V^2_{eff} + \mathcal{E}^2_{eff} + 2\, V_{eff} \left(\cos\varphi\, I_{eff}\, R + \sin\varphi \sqrt{\mathcal{E}^2_{eff} - I^2_{eff}\, R^2} \right) \qquad (3)$$

C'est la relation cherchée entre les valeurs efficaces de la force électromotrice induite développée par l'armature, de la chute de tension à l'intérieur de celle-ci et de la différence de potentiel aux bornes.

Elle permet de calculer l'une d'elles en fonction des deux autres, quand on connaît d'autre part la résistance réelle de l'induit, l'intensité efficace du courant débité et le décalage du courant sur la différence de potentiel utile. Mais, le plus souvent, les problèmes de l'espèce sont d'une résolution plus simple par des méthodes graphiques équivalentes qu'il est aisé de déduire des propriétés géométriques du diagramme de la fig. 26.

Soit, par exemple, à trouver la force électromotrice induite efficace, quand on connait V_{eff}, $\mathcal{E}_{eff}$, I_{eff}, R et φ.

Traçons une circonférence de rayon $\frac{1}{2}\, \mathcal{E}_{eff}$, et menons un de ses diamètres BF (fig. 27). Du point B, tirons une corde BD égale à I_{eff} R et sur une droite faisant, avec le prolongement de cette corde, l'angle φ, portons à partir de B une longueur BO = V_{eff}. OF représente, à l'échelle du dessin, la force électromotrice induite E_{eff} cherchée.

Digitized by Google

S'il s'agit de trouver $\mathcal{E}_{eff}$ quand les autres grandeurs sont données, sur le prolongement d'une droite faisant un angle φ avec un vecteur OB $= V_{eff}$, on porte une longueur

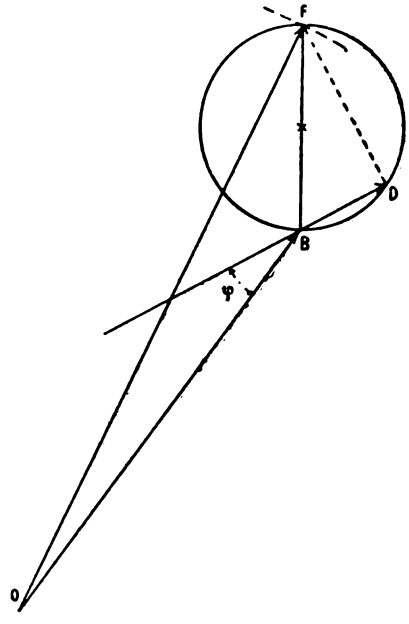


Fig. 27.

BD $= I_{eff} R$ à l'extrémité de laquelle on élève une perpendiculaire. Avec un rayon égal à E_{eff} on trace, du point O comme centre, un arc de cercle coupant la perpendiculaire en F. BF est la longueur figurative de $\mathcal{E}_{eff}$.

Il y a lieu d'observer que la résistance réelle R de l'enroulement induit d'un alternateur peut être sensiblement supérieure à la valeur calculée, de la manière ordinaire, d'après les dimensions des conducteurs, lorsque

Digitized by Google

ceux-ci sont très gros. Car, ainsi que l'a montré Lord Kelvin, la répartition du courant n'est pas uniforme dans toute l'étendue de la section transversale d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs. La densité du courant est plus grande vers la périphérie, et l'inégalité est d'autant plus accusée que la fréquence $\frac{1}{T}$ du courant est plus élevée et les dimensions de la section plus fortes, pour une forme déterminée de cette dernière. La formule ci-après, calculée par M. Potier, donne, dans le cas d'un conducteur circulaire plein de section s, le rapport entre les résistances réelles R_a et R_c pour les courants alternatifs et pour les courants continus, ρ étant la résistibilité du cuivre :

$$\frac{R_a}{R_c} = 1 + \frac{1}{12}\left[\frac{2\pi}{T}\frac{s}{\rho}\right]^2 - \frac{1}{180}\left[\frac{2\pi}{T}\frac{s}{\rho}\right]^4 + \ldots\ldots$$

Remarquons, en outre, que, si l'on veut tenir compte de la réaction des courants de Foucault induits par le courant de l'armature dans les masses métalliques voisines, notamment dans les épanouissements polaires massifs des inducteurs, il suffit de majorer encore la valeur introduite dans les calculs pour la résistance de l'induit, en ajoutant à R un terme homogène proportionnel au carré de la fréquence. En effet, en vertu de la loi générale de l'induction, les courants de Foucault en question sont proportionnels, au temps t, à $-\frac{dI}{dt}$ si l'on néglige la self-induction des masses qui en sont le siége, et les forces électromotrices qu'ils développent, par induction secondaire, dans l'enroulement induit sont alors proportionnelles à

$$-\frac{d}{dt}\left(-\frac{dI}{dt}\right) = -\left(\frac{d^2}{dt^2}\right)^2 I_{max} \sin \alpha.$$

Digitized by Google

On voit donc que ces forces électromotrices secondaires sont sensiblement en opposition de phase avec le courant de l'armature et occasionnent, par suite, une chute de potentiel efficace, proportionnelle à $\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 I_{eff}$, qui s'additionne numériquement à celle, $R I_{eff}$, due à la résistance réelle de l'induit. Le remplacement de R par une expression de la forme $\left(R + \frac{a}{T^2}\right)$ introduit cette perte additionnelle dans les formules.

Souvent le terme $\frac{a}{T^2}$ est plus important que R. Cependant, leur somme est ordinairement petite comparée à la réactance $\frac{2\pi}{T}\mathfrak{L}$ de l'armature, et l'on a approximativement $\cos\varphi = \frac{I_{eff}\left(R + \frac{a}{T^2}\right)}{\mathfrak{E}_{eff}} = o$.

Les relations (2) et (3) établies plus haut, qui, dans ce dernier cas se simplifient ainsi,

$$\mathfrak{E}_{eff} = \frac{2\pi}{T}\mathfrak{L} I_{eff}, \quad (2')$$

$$E^2_{eff} = V^2_{eff} + \mathfrak{E}^2_{eff} + 2V_{eff}\mathfrak{E}_{eff}\sin\varphi, \quad (3')$$

et les constructions graphiques qui les représentent ne sont rigoureuses que dans l'hypothèse où l'on a affaire à des fonctions périodiques simplement sinusoïdales et à un coefficient de self-induction $\mathfrak{L}$ invariable. La première condition est rarement réalisée dans les alternateurs industriels et le coefficient de self-induction de leur enroulement induit varie périodiquement, pour une excitation déterminée, avec la position de la partie mobile de la machine, principalement à cause de la déformation continuelle des circuits magnétiques dans lesquels s'étendent les flux dus au courant de l'armature. M. Pichelmayer a constaté un

Digitized by Google

écart de 16 pour 100 de la valeur moyenne entre les valeurs maxima et minima du coefficient, dans une petite machine tétrapolaire, à tambour lisse bobiné suivant le schéma de la fig. 2, et dans laquelle $l_a = l_p = \frac{2}{3}$ L.

On peut toutefois, sans s'exposer à des mécomptes sérieux, utiliser les résultats précédents dans le calcul d'un avant-projet d'alternateur, comme on le fait habituellement.

Expression du coefficient de self-induction de l'armature. — Quand on applique ainsi la formule

$$\mathcal{E}_{eff} = I_{eff} \sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} \mathfrak{L}^2}$$

aux alternateurs industriels, quelle est la valeur qu'il convient d'attribuer à $\mathfrak{L}$?

Cette valeur, sorte de moyenne, pourrait être déterminée expérimentalement assez simplement et avec une approximation suffisante, si la machine était construite. En effet, en faisant abstraction de l'influence de la réaction magnétique de l'induit sur la dispersion du flux inducteur et sur la perméabilité des circuits magnétiques, on peut admettre que la force électromotrice induite développée dans l'armature est la même à toutes les charges lorsque le courant traversant l'enroulement inducteur est maintenu invariable. D'autre part, il ne semble pas que la valeur de $\mathfrak{L}$ soit sérieusement modifiée par les changements du courant efficace débité et du décalage de ce dernier sur la force électromotrice induite. Dès lors, soient, dans des conditions d'excitation constante et à la vitesse de régime correspondant à la fréquence $\frac{1}{T}$, E'_{eff} la différence de potentiel relevée aux bornes de l'induit tournant d'abord à circuit ouvert et

Digitized by Google

I'_{eff} le courant produit par l'armature mise ensuite en court-circuit sur elle-même par l'appareil, de résistance et de réactance négligeables, utilisé à la mesure des intensités. L'impédance du circuit, dans la seconde expérience, est sensiblement $\frac{E'_{eff}}{I'_{eff}}$ et la valeur cherchée de $\mathfrak{L}$ peut être tirée de l'équation

$$\frac{E'_{eff}}{I'_{eff}} = \sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2}\mathfrak{L}^2}.$$

Cette valeur décroît à mesure que l'excitation des inducteurs à laquelle elle correspond devient plus forte, par suite de la diminution de perméabilité qu'entraîne la saturation graduelle de la carcasse magnétique de la machine.

Il est utile de noter que, vu la faible valeur de la résistance de l'induit comparée à la réactance de celui-ci, l'intensité du courant débité en court-circuit est sensiblement indépendante de la vitesse, car la force électromotrice induite et la réactance sont toutes deux proportionnelles à la fréquence. La circulation de ce courant dans les conducteurs de la machine peut, en général, être tolérée sans inconvénient, pendant le temps restreint nécessité par sa mesure.

L'estimation directe de la valeur de $\mathfrak{L}$, par le calcul d'après les dimensions de l'alternateur, est pour ainsi dire impossible, étant données les causes complexes qui influent sur le coefficient de self-induction de l'armature d'un alternateur et les variations de ce coefficient avec la position relative de l'inducteur et de l'induit. Il est malaisé d'introduire dans les formules l'influence des dimensions relatives des surfaces polaires et des faisceaux de conducteurs actifs de l'armature, des conditions d'établissement de ces conducteurs qui peuvent être appliqués

Digitized by Google

contre des noyaux en fer lisses, logés dans les rainures plus ou moins ouvertes de noyaux dentés ou passés dans les trous de noyaux perforés, des déformations progressives des circuits magnétiques que suivent les lignes de force produites par l'enroulement induit, des dérivations de flux variables à travers l'air autour de la carcasse magnétique de la machine, etc.

Voici un moyen pratique de tourner la difficulté, en utilisant, pour l'évaluation approchée de la valeur de $\mathfrak{L}$ convenant à une machine, les données expérimentales recueillies sur d'autres alternateurs du même type. Lorsque l'organe mobile d'un alternateur occupe la position dans laquelle les faisceaux de conducteurs actifs de l'induit encadrent symétriquement les pièces polaires, le calcul du coefficient de self-induction de l'armature est relativement aisé. Soit $\mathfrak{L}_o$ la valeur calculée dans ces conditions, par les formules simples indiquées plus loin, sans tenir compte des pertes de flux et en attribuant aux diverses masses magnétiques de la carcasse traversées par le flux induit les perméabilités correspondant aux inductions dues à la seule action magnétisante du courant inducteur.

On peut écrire

$$\mathfrak{L} = j\mathfrak{L}_o, \qquad (4)$$

et admettre, sans grande erreur, que le coefficient j est sensiblement indépendant, pour un même modèle de machine, des dimensions absolues de l'alternateur et de l'état de saturation de la carcasse magnétique, pourvu qu'on ne s'écarte pas des limites normales de fonctionnement des appareils.

Dans l'étude du projet d'une machine, on pourra donc évaluer $\mathfrak{L}$ par la formule (4) en adoptant pour j le rapport, relevé sur une machine semblable existante, entre la valeur moyenne du coefficient de self-induction déduite

Digitized by Google

de la force électromotrice à vide et de l'intensité du courant en court-circuit déterminées expérimentalement avec le courant inducteur normal et la valeur particulière calculée approximativement, comme il est dit plus haut, dans les mêmes conditions d'excitation.

La comparaison des coefficients j relatifs à des alternateurs de genres variés mettra en évidence l'influence des éléments caractéristiques de ceux-ci et servira de guide pour le choix du coefficient applicable dans le calcul d'une machine d'un type nouveau.

Il est d'ailleurs à noter qu'une variation même assez considérable de $\mathfrak{L}$ n'entraîne, dans les cas normaux, qu'une différence faible dans la valeur de la force électromotrice induite nécessaire pour l'obtention d'une différence de potentiel donnée aux bornes. En effet, les formules approchées (2') et (3') montrent que la variation relative de $\mathfrak{E}_{eff}$ est sensiblement égale à celle de $\mathfrak{L}$ et qu'on a approximativement

$$\frac{dE_{eff}}{E_{eff}} = \frac{(\mathfrak{E}_{eff} + V_{eff}\sin\varphi)\, d\mathfrak{E}_{eff}}{V^2_{eff} + \mathfrak{E}^2_{eff} + 2V_{eff}\mathfrak{E}_{eff}\sin\varphi} = \frac{\frac{\mathfrak{E}_{eff}}{V_{eff}} + \sin\varphi}{\frac{V_{eff}}{\mathfrak{E}_{eff}} + \frac{\mathfrak{E}_{eff}}{V_{eff}} + 2\sin\varphi} \cdot \frac{d\mathfrak{E}_{eff}}{\mathfrak{E}_{eff}}.$$

Si, par exemple, $\frac{\mathfrak{E}_{eff}}{V_{eff}} = 0{,}20$ et $\sin\varphi = 0{,}66$, une erreur relative $\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} = \frac{d\mathfrak{E}_{eff}}{\mathfrak{E}_{eff}}$ de 25 pour 100 commise dans l'estimation du coefficient de self-induction, n'introduit dans la valeur calculée de la force électromotrice induite qu'une erreur relative égale à

$$\frac{dE_{eff}}{E_{eff}} = \frac{0{,}20 + 0{,}66}{\frac{1}{0{,}20} + 0{,}20 + 2.0{,}66} \cdot 0{,}25 = 0{,}033,$$

soit environ 3 pour 100.

Digitized by Google

Il nous reste à établir les formules reliant, dans les divers genres de machines, le coefficient conventionnel $\mathfrak{L}_o$ aux données de construction. Nous désignerons par L et S la longueur et la section moyennes du flux dû à l'induit dans les diverses parties du circuit magnétique qu'il traverse et par μ la perméabilité moyenne de celles-ci, estimée sans tenir compte des modifications que le flux en question apporte aux inductions produites par le courant inducteur. Ces notations seront affectées d'un des indices *a*, *e*, *p*, *i* ou *c* suivant que la partie de circuit consi-

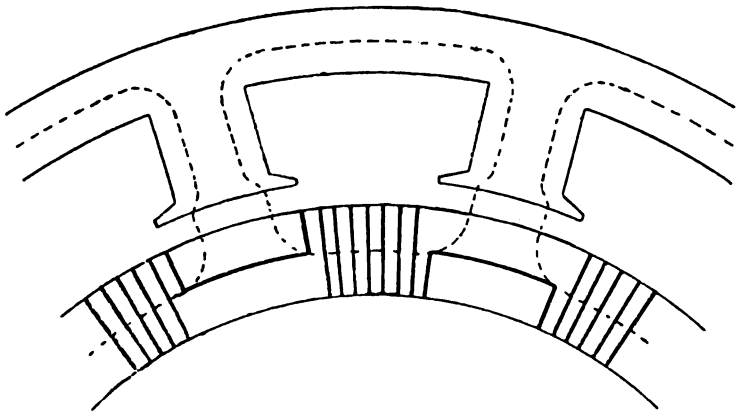


Fig. 28.

dérée appartient au noyau de l'armature, à l'entrefer, aux pièces polaires, aux noyaux ou aux culasses de l'inducteur. Les figures annexées précisent dans chaque cas la signification des symboles et indiquent la position relative de l'inducteur et de l'induit à laquelle s'applique le calcul. Soient d'ailleurs, comme précédemment, *p* et *n* respectivement le nombre de pôles inducteurs et le nombre total de conducteurs actifs sur l'induit, que nous supposerons reliés tous en série entr'eux.

Digitized by Google

A. — *Alternateurs à pôles de noms contraires.*

a. — Induits à anneau (fig. 28).

Le flux créé par une bobine induite, présentant m spires parcourues par un courant I, a pour expression, abstraction faite de la dispersion des lignes de force à travers l'air ambiant,

$$\frac{4\pi m\,\mathrm{I}}{\frac{\mathrm{L}_a}{\mu_a \mathrm{S}_a}+\frac{2\mathrm{L}_e}{\frac{1}{2}\mathrm{S}_e}+\frac{2\mathrm{L}_p}{\mu_p \frac{1}{2}\mathrm{S}_p}+\frac{2\mathrm{L}_i}{\mu_i \frac{1}{2}\mathrm{S}_i}+\frac{\mathrm{L}_c}{\mu_c \mathrm{S}_c}}.$$

Son coefficient de self-induction est, par suite,

$$\frac{4\pi m^2}{\frac{\mathrm{L}_a}{\mu_a \mathrm{S}_a}+4\frac{\mathrm{L}_e}{\mathrm{S}_e}+4\frac{\mathrm{L}_p}{\mu_p \mathrm{S}_p}+4\frac{\mathrm{L}_i}{\mu_i \mathrm{S}_i}+\frac{\mathrm{L}_c}{\mu_c \mathrm{S}_c}}$$

et celui de l'enroulement induit entier qui comporte autant de bobines semblables que de pôles inducteurs est p fois plus grand. Comme $m = \frac{n}{p}$, on obtient

$$\mathfrak{L}_o = \frac{\mathrm{I}}{p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{\mathrm{L}_a}{\mu_a \mathrm{S}_a}+4\frac{\mathrm{L}_e}{\mathrm{S}_e}+4\frac{\mathrm{L}_p}{\mu_p \mathrm{S}_p}+4\frac{\mathrm{L}_i}{\mu_i \mathrm{S}_i}+\frac{\mathrm{L}_c}{\mu_c \mathrm{S}_c}}.$$

b. — Induits à tambour (fig. 29).

Si les conducteurs actifs de l'armature sont reliés en zigzag de manière à constituer un circuit faisant m fois le tour du noyau (fig. 1), on peut considérer l'ensemble comme une bobine unique de m spires, enlacée par p flux dont les lignes de force suivent des trajectoires du genre de celles figurées en pointillé dans la fig. 29.

Le flux total traversant la bobine est donc

$$\frac{4\pi m\,\mathrm{I}}{\frac{\mathrm{I}}{p}\left(\frac{\mathrm{L}_a}{\mu_a \mathrm{S}_a}+\frac{2\mathrm{L}_e}{\frac{1}{2}\mathrm{S}_e}+\frac{2\mathrm{L}_p}{\mu_p \cdot \frac{1}{2}\mathrm{S}_p}+\frac{2\mathrm{L}_i}{\mu_i \cdot \frac{1}{2}\mathrm{S}_i}+\frac{\mathrm{L}_c}{\mu_c \mathrm{S}_c}\right)}$$

Digitized by Google

et le coefficient de self-induction

$$p \frac{4\pi m^2}{\frac{L_a}{\mu_a S_a} + 4\frac{L_e}{S_e} + 4\frac{L_p}{\mu_p S_p} + 4\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{L_c}{\mu_c S_c}}.$$

Substituant à m sa valeur $\frac{n}{p}$, il vient

$$\mathfrak{L}_0 = \frac{I}{p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_a}{\mu_a S_a} + 4\frac{L_e}{S_e} + 4\frac{L_p}{\mu_p S_p} + 4\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{L_c}{\mu_c S_c}}.$$

On obtient encore la même expression si l'enroulement induit comporte des bobines juxtaposées dont les côtés contigus constituent les faisceaux de conducteurs actifs de l'armature (fig. 2). En effet, les trajectoires des flux

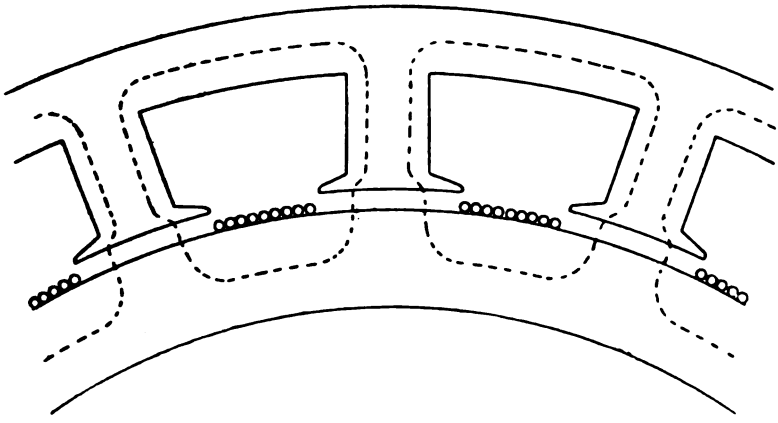


Fig. 29.

magnétiques sont les mêmes que dans le cas dont il vient d'être question : chaque bobine est traversée par deux flux dérivés qui traversent chacun deux bobines voisines. Celles-ci comptent $\frac{m}{2}$ spires.

Digitized by Google

Le flux total à travers une des p bobines de l'induit étant

$$2 \frac{2 \times 4\pi \frac{m}{2} I}{\frac{L_a}{\mu_a S_a} + \frac{2 L_e}{\frac{1}{2} S_e} + \frac{2 L_p}{\mu_p \cdot \frac{1}{2} S_p} + \frac{2 L_i}{\mu_i \cdot \frac{1}{2} S_i} + \frac{L_c}{\mu_c S_c}},$$

on trouve, pour le coefficient de self-induction de tout l'enroulement,

$$\mathfrak{L}_o = 2p \frac{2 \times 4\pi \frac{m^2}{4}}{\frac{L_a}{\mu_a S_a} + 4\frac{L_e}{S_e} + 4\frac{L_p}{\mu_p S_p} + 4\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{L_c}{\mu_c S_c}}$$

$$= \frac{I}{p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_a}{\mu_a S_a} + 4\frac{L_e}{S_e} + 4\frac{L_p}{\mu_p S_p} + 4\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{L_c}{\mu_c S_c}}.$$

c. — Induits à disque (fig. 30).

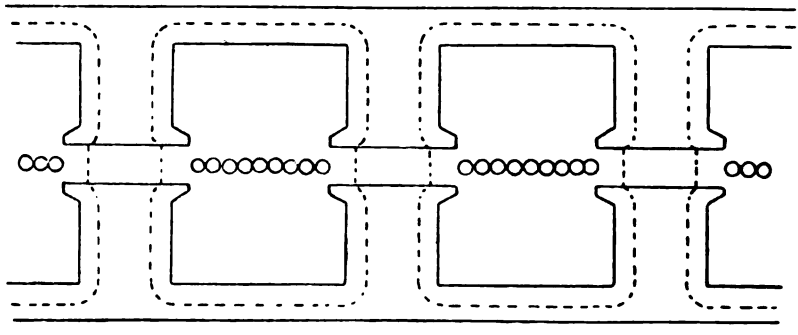


Fig. 30.

En raisonnant exactement comme à propos des armatures à tambour, on reconnaît aisément qu'avec les induits à disque, on a

$$\mathfrak{L}_o = \frac{I}{p} \cdot \frac{4\pi n^2}{4\frac{L_e}{S_e} + 8\frac{L_p}{\mu_p S_p} + 8\frac{L_i}{\mu_i S_i} + 2\frac{L_c}{\mu_c S_c}},$$

Digitized by Google

que l'enroulement appartienne au type à zigzag ou au type à bobines distinctes.

B. — *Alternateurs à pôles de même nom.*

a. — Induits à disque (fig. 31).

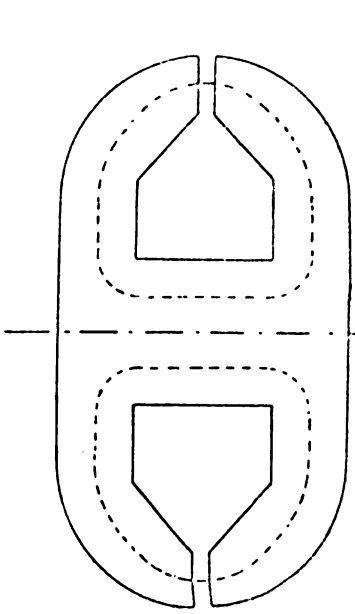


Fig. 31.

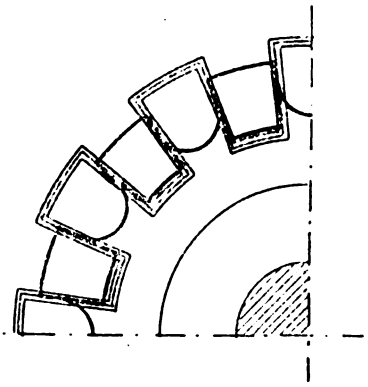


Fig. 32.

Examinons d'abord le cas de l'enroulement en zigzag (fig. 4), constituant une bobine étoilée de m spires. Lorsque les pièces polaires inductrices se trouvent entre les branches de l'étoile (fig. 32), la bobine engendre dans le corps de l'inducteur autour duquel elle est disposée un flux magnétique fermé sur lui-même, à l'extérieur de l'enroulement, entre les pôles en regard. Ce flux a pour expression

$$\frac{4\pi m I}{\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{2 L_p}{\mu_p S_p} + \frac{1}{p} \cdot \frac{L_e}{S_e}}$$

Digitized by Google

S_i étant la section du noyau central unique de l'inducteur, S_p la section moyenne totale d'un des épanouissements qui le terminent, évaluée normalement aux lignes de force rayonnantes, et S_e la section du flux dans l'entrefer entre deux dents polaires opposées. On en déduit pour le coefficient de self-induction correspondant

$$\mathfrak{L}_0 = \frac{4\pi m^2}{\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{2 L_p}{\mu_p S_p} + \frac{1}{p}\frac{L_e}{S_e}}$$

$$= \frac{1}{4p^2} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_i}{\mu_i S_i} + \frac{2 L_p}{\mu_p S_p} + \frac{1}{p} \cdot \frac{L_e}{S_e}}$$

ou

$$\frac{1}{4p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_i}{\mu_i \cdot \frac{1}{p} S_i} + \frac{2L_p}{\mu_p \cdot \frac{1}{p} S_p} + \frac{L_e}{S_e}},$$

attendu que dans le cas présent $n = 2pm$.

Avec l'enroulement à bobines juxtaposées au nombre de $2p$ (fig. 5), on négligerait la self-induction de la moitié du circuit, si l'on ne tenait compte que des flux qui s'étendent à travers la carcasse de l'inducteur suivant des trajectoires telles que celles tracées dans la fig. 31, car ces flux ne sont dûs qu'à la force magnétomotrice des bobines disposées en regard des dents polaires. Les bobines comprises entre les dents consécutives concourent avec les précédentes à la production de flux additionnels enlaçant les faisceaux de conducteurs actifs de l'armature et dont une notable partie des circuits magnétiques est constituée par l'air (fig. 33). On évitera la complication qu'entraîne la considération des deux séries de lignes de force en même temps qu'on uniformisera les formules,

Digitized by Google

en adoptant conventionnellement dans ce cas, pour l'évaluation de j et $\mathfrak{L}$, le coefficient $\mathfrak{L}_o$ auquel conduit le calcul si l'on suppose que les conducteurs des faisceaux induits encadrant les dents contribuent tous à la production des flux traversant la carcasse magnétique de l'inducteur. Il en serait réellement ainsi si, au lieu d'être groupés en un

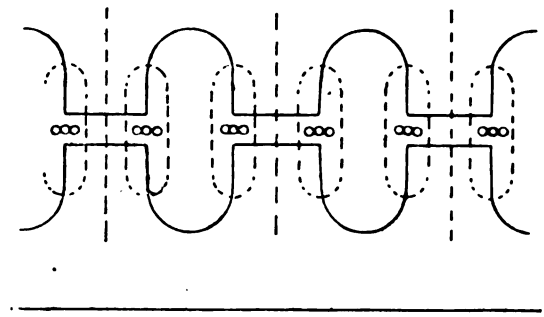


Fig. 33.

enroulement tout à fait symétrique de $2p$ bobines, tel que celui de la fig. 5, les conducteurs actifs de l'armature étaient partagés, comme ils pourraient l'être, entre p bobines de $\frac{n}{2p}$ spires, comme l'indique le schéma après (fig. 34).

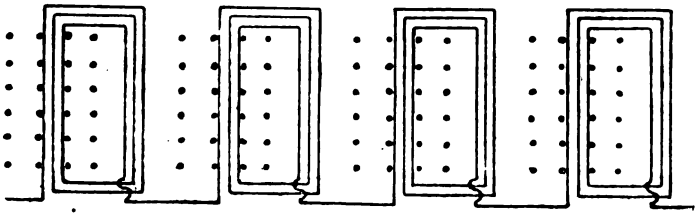


Fig. 34.

Digitized by Google

Quand ces bobines sont disposées en face des dents polaires de l'inducteur, le flux que chacune d'elles engendre est égal à

$$\frac{4\pi \frac{n}{2p} \cdot I}{\frac{L_e}{S_e} + \frac{2\,L_p}{\mu_p \cdot \frac{I}{p} S_p} + \frac{L_i}{\mu_i \cdot \frac{I}{p} S_i}},$$

de sorte que le coefficient de self-induction de l'ensemble est

$$\mathcal{L}_o = p \cdot \frac{4\pi \frac{n^2}{4p^2}}{\frac{L_e}{S_e} + \frac{2\,L_p}{\mu_p \cdot \frac{I}{p} S_p} + \frac{L_i}{\mu_i \cdot \frac{I}{p} S_i}}$$

$$= \frac{I}{4p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_e}{S_e} + \frac{2\,L_p}{\mu_p \cdot \frac{I}{p} S_p} + \frac{L_i}{\mu_i \cdot \frac{I}{p} S_i}}.$$

On remarquera qu'on retrouve ainsi, comme dans le cas des inducteurs à pôles de noms contraires, la formule qui convient à l'enroulement en zigzag.

b. — Induits à tambour (fig. 35).

Il est aisé d'étendre aux induits à tambour les raisonnements qui viennent d'être appliqués aux armatures à disque. On est ainsi conduit à adopter pour les enroulements à zigzag et à bobines des tambours la même formule

$$\mathcal{L}_o = \frac{I}{4p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\frac{L_e}{S_e} + \frac{L_a}{\mu_a \cdot \frac{I}{p} S_a} + \frac{L_i}{\mu_i \cdot \frac{I}{p} S_i} + \frac{L'_e}{\frac{I}{p} S'_e} + \frac{L_p}{\mu_p \cdot \frac{I}{p} S_p}},$$

Digitized by Google

dans laquelle S_e est la surface polaire terminale d'une seule dent de la masse de fer tournante de l'inducteur, tandis que S_a, S_i, S_p et S'_i représentent les sections moyennes totales offertes, respectivement dans le noyau feuilleté de l'armature, dans la partie fixe de l'inducteur, dans sa

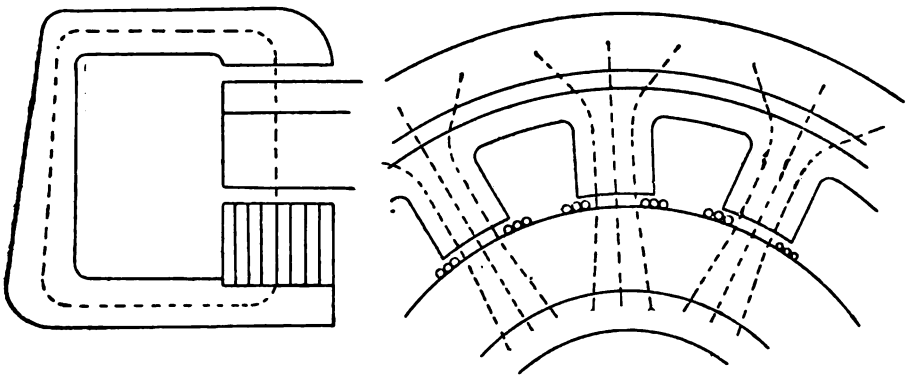


Fig. 35.

partie mobile et dans l'entrefer supplémentaire qui sépare ces deux dernières, au flux magnétique de l'induit, dont les lignes de force suivent tout autour de l'axe de rotation de l'alternateur, du genre Thury, des trajectoires semblables à celles pointillées dans la fig. 35.

Il est intéressant de noter que, si l'on désigne par $\Sigma\mathfrak{R}$ la reluctance d'un des p circuits dérivés partiels entre lesquels le flux de l'induit se partage à travers la carcasse magnétique des divers types d'alternateurs, dans les positions relatives de l'armature et de l'inducteur examinées, toutes les expressions trouvées précédemment pour $\mathfrak{L}_o$ se ramènent à la forme

$$\mathfrak{L}_o = \frac{1}{p} \cdot 4\pi \frac{n^2}{\Sigma\mathfrak{R}} \qquad (5')$$

Digitized by Google

quand les inducteurs sont à pôles de noms contraires et à la forme

$$\mathfrak{L}_o = \frac{1}{4p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\Sigma \mathfrak{R}} \qquad (5'')$$

dans le cas des inducteurs à pôles de même nom.

Les circuits magnétiques considérés dans ces formules sont d'ailleurs les mêmes que ceux dans lesquels s'étendent les lignes de force du flux inducteur entretenu par le courant qui parcourt les bobines excitatrices.

(*Applaudissements.*)

(A suivre.)

La séance est levée à midi et demi.

Digitized by Google

SÉANCE DU 27 JUIN 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DES MEMBRES EFFECTIFS.

Le seul objet à l'ordre du jour est l'élection du Président pour l'année sociale 1897-1898.

Prennent part au vote, soit directement, soit par correspondance : MM. Alfieri, Basquin, Biske, Bourquin, Briffaux, Brunhes, Bunnik, Calmeau, Centurione, Chantraine, Chaudoir, Couard, Crombé, De Bast, Decroës, De Gnoinski, Del Proposto, Derclaye, De Ryckère, de Woyciechowski, Durand, du Welz, Everarts, Firket, Fontaine, Gerleri, Giustetti, Grottendieck, Henrion, Herdt, Hertz, Horowitz, Ilkoff, Javal, Julius, Lechat, P., L'Hoest, Loewenstein, Massange, Mathieu, Melotte, Nieuwland, Nobili, Pescetto, Pierron. Poenaru, Quinaux, Rensonnet, Rousseau, Scandiani, Sée, Van Vloten, Verdeleanu, Ver Eecke, Von Hahn, Winslow.

M. Del Proposto est élu Président (*Applaudissements.*)

Avant de se séparer, l'Assemblée, sur la proposition du Secrétaire-Général, vote, à l'unanimité, la disposition suivante relative à la confection des bulletins d'élection :

« L'Assemblée, constatant, d'une part, le succès du mode de votation par correspondance pour l'élection des membres du Comité, et voulant, en outre, perfectionner le mode adopté qui a donné lieu à quelques critiques sur des détails d'exécution ;

Digitized by Google

« Considérant qu'en accordant à un candidat son suffrage pour la vice-présidence, l'électeur manifeste son désir de voir ce candidat faire partie du Comité ; que, dès lors, il est juste d'attribuer au candidat au mandat de Commissaire les suffrages qui lui ont été accordés pour la vice-présidence ;

» Décide :

» Les suffrages attribués pour la vice-présidence à un candidat non élu à ce mandat, lui seront acquis pour le mandat de Commissaire, indépendamment des suffrages qu'il aura obtenu explicitement pour ce mandat.

» Comme conséquence de cette décision, il n'est plus permis aux électeurs dans leur bulletin de vote d'accorder leur suffrage à un même candidat, pour le mandat de vice-président et celui de commissaire. »

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade, M. Broad, Colin, avec Mlle Broad, Léonie.

* * *

Lampes à arc destinées à l'éclairage de la rue (*). — M. Hesketh passe en revue les moyens par lesquels ou pourrait faire produire aux lampes à arc destinées à l'éclairage de la rue, la plus grande quantité de lumière de la manière la plus avantageuse, et résume comme suit les conclusions auxquelles il arrive :

1. Les régulateurs actuels sont des merveilles de mécanique qui maintiennent déjà une tension constante dans des limites de 1 à 1 $^1/_2$ %. Dans cette direction, on n'aura plus guère de progrès à attendre.

2. Il convient de réduire le diamètre des charbons ; la chaleur produite étant concentrée dans un volume moindre, la chaleur perdue par radiation et conduction est moindre aussi au bénéfice de l'intensité lumineuse. Toutefois, cette réduction du diamètre des charbons est limitée par l'augmentation du coût d'entretien qui s'accroît par suite de la diminution de la durée des charbons.

3. Au delà d'une certaine tension (que M. Hesketh ne mentionne pas) l'intensité moyenne sphérique est à peu près proportionnelle à la longueur de l'arc. D'un autre côté l'énergie absorbée augmente également. La longueur

(*) *The Electrician*, April 9, Thomas Hesketh.

Digitized by Google

de l'arc pourrait donc être laissée de côté, dans l'examen de la question, si l'allongement de l'arc n'avait pas pour effet d'augmenter spécialement l'intensité horizontale, en vue de l'éclairage de la rue.

M. Hesketh donne ensuite les résultats d'essais identiques effectués sur une lampe à arc ordinaire et une lampe à arc « Jandus » (fig. 1, 2 et 3).

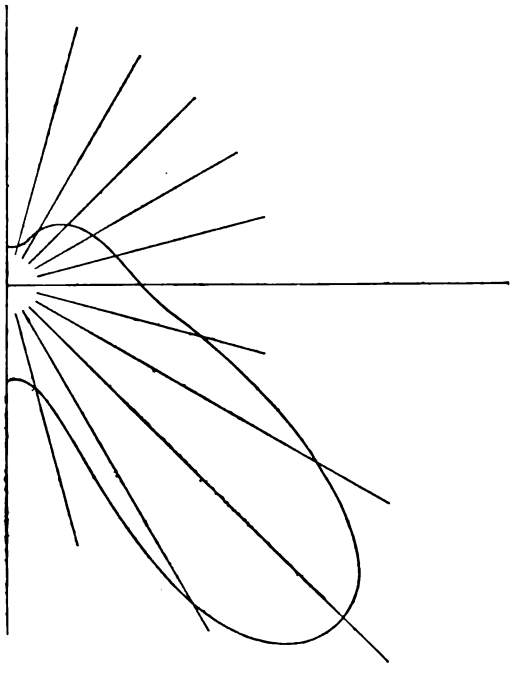


Fig. 1.

Fig. 1. Donne la courbe de l'intensité lumineuse de la lampe ordinaire pourvue de globe opalin ; diamètre des charbons, 18 et 12 m/m ; courant continu, 10 ampères ; tension aux charbons, 46 volts.

Digitized by Google

Fig. 2. Donne la courbe correspondante d'une lampe « Jandus » pourvue de deux globes opalins, l'un intérieur, l'autre extérieur ; courant, 5,5 ampères ; tension aux charbons, 78 volts (les diamètres des charbons ne sont pas donnés).

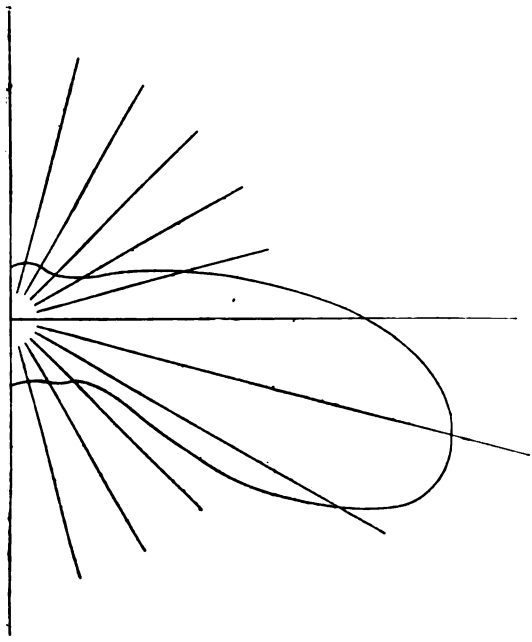


Fig. 2.

L'intensité horizontale plus grande de la « Jandus » peut être attribuée partiellement à la forme ovoïde du globe intérieur.

Mais l'avantage est dû principalement à la longueur extrême de l'arc, la forme aplatie des pointes des charbons et l'absence presque totale d'un cratère dans le charbon positif.

Digitized by Google

On pourra se rendre compte de l'influence de ces résultats sur l'éclairement de la rue, par la fig. 3 (*).

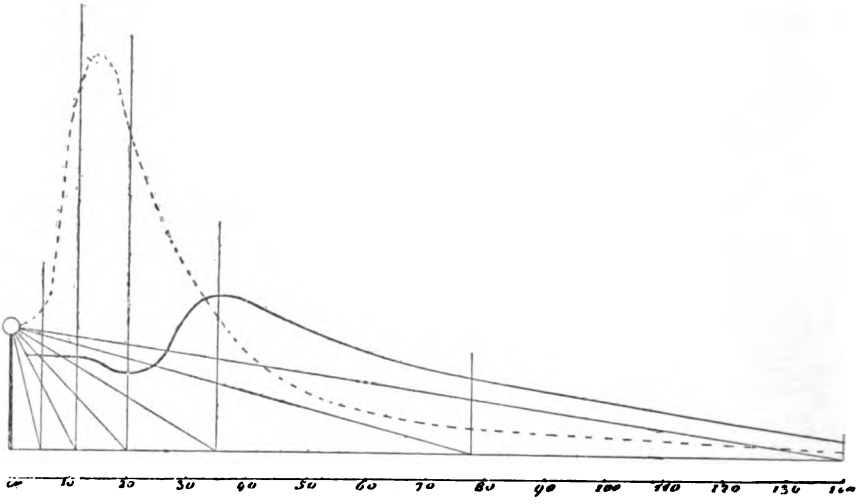


Fig. 3.

Près du pied du poteau, l'éclairement par la lampe ordinaire (figuré en pointillé) est environ quatre fois celui de la « Jandus » (courbe pleine). Mais, à une distance du pied de 1,6 fois la hauteur du poteau, les deux éclairements sont égaux ; à partir de 2,5 fois la hauteur du poteau, la « Jandus » donne un éclairement plus de deux fois celui de l'autre et maintient cet avantage.

Des considérations précédentes, M. Hesketh conclut que la lampe de l'avenir sera d'un modèle hermétiquement fermé, et qu'on y aura des diamètres de charbons réduits, la diminution de la durée de ces charbons étant compensée par l'augmentation de lumière obtenue.

V. M.

(*) Les deux lampes consomment la même énergie.

Digitized by Google

SÉANCE DU 1er AOUT 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. Bayet, Berlow, Bertholet, Caldarera, Callet, Calmeau, Centonze, Compyn, De Bast, Della Giusta, Delmonte, Del Proposto, De Luboradzki, De Meglitzky, Duchesne, Gérard Am., L'Hoest, Maus, Mélotte, Nicolini, Nuzzaci, Robert L., Robert P., Sweginski, Theunis, Viscidi, Weker.

La parole est donnée à **M. Del Proposto**, qui expose en ces termes le principe de la

Télégraphie sans conducteur par le procédé Marconi.

La découverte de la possibilité de la télégraphie sans fils, qui, dans ces derniers temps, a fait beaucoup de bruit dans la presse technique et surtout dans les journaux politiques, est la première application directe d'une série de nombreuses études qui ont commencé depuis longtemps et qui constituent le plus grand progrès de la physique pendant ce siècle. Ces études ont eu pour résultat l'abandon de la vieille hypothèse de l'action à distance et son remplacement par la nouvelle, basée sur l'intervention du milieu dans tout phénomène physique. Maxwell est le principal auteur de cette théorie, aujourd'hui acceptée universellement, surtout après les nombreuses confirmations expérimentales qu'elle a reçues, parmi lesquelles celles de Hertz, relatives à la transmission des ondes électromagnétiques, sont restées classiques. C'est préci-

Digitized by Google

sément sur les propriétés de ces ondes qu'est basé le système télégraphique Marconi.

Beaucoup de phénomènes physiques se transmettent par ondes : on l'a démontré, du moins pour le son, la lumière et l'électricité en mouvement périodique. La théorie de Maxwell rattache les phénomènes électromagnétiques aux phénomènes lumineux, en démontrant que tous sont dus à des vibrations de l'éther dont l'existence est aussi prouvée et compréhensible que celle des forces.

Lorsque, par un moyen quelconque, on produit une perturbation dans l'éther, celui-ci entre en vibration et, par son élasticité, propage la perturbation sous forme d'ondes. Les ondes rencontrent les corps et y produisent les phénomènes que, suivant la vieille théorie, on attribuait à l'action à distance. La constitution intime de l'éther nous est inconnue, mais un pas considérable dans ce sens a été réalisé par Maxwell, qui montra que la vitesse de propagation des ondes est la même que celle de la lumière (300 000 km par 1″).

Un moyen que l'on connaît actuellement pour produire des ondes électromagnétiques de grande fréquence est la décharge d'un condensateur. On sait que cette décharge est oscillante lorsque la résistance, la self-induction du circuit de décharge, ainsi que la capacité du condensateur satisfont à la condition

$$r < \sqrt{\frac{4L}{c}} \ldots (1).$$

Ce phénomène a été indiqué la première fois par Von Helmholtz. Lord Kelvin en a donné ensuite la théorie. Hertz constata le premier que cette décharge engendrait, dans le milieu ambiant, des ondes jouissant des mêmes propriétés que les ondes lumineuses Ses expériences don-

Digitized by Google

nèrent la première base expérimentale à la théorie de Maxwell. Si le phénomène se limitait à une seule décharge, on comprend aisément que, par suite de la petitesse même de l'énergie en jeu, il ne serait sensible qu'à très-faible distance ; on augmente celle-ci en faisant en sorte que les décharges se répètent continuellement. On peut dire, *à priori*, que la distance à laquelle on aura des effets sensibles sera d'autant plus grande que l'énergie de chaque décharge faite en un seul sens est plus grande et que le nombre en est plus élevé. L'appareil qui est capable de produire des ondes électromagnétiques de grande fréquence a été appelé, par Hertz, *excitateur;* celui qui permet de constater la transmission des ondes est le *résonnateur*. Ces appellations résultent de la grande ressemblance que les phénomènes produits par les ondes électromagnétiques ont avec ceux produits par les ondes sonores. Les deux appareils peuvent être identiques ou bien avoir des formes différentes ; cependant, pour avoir un effet maximum, ils doivent être *accordés*, c'est à dire avoir la même période principale ou note dominante ; sans cela, les effets sont beaucoup moins sensibles, car l'accord a lieu, alors, pour des harmoniques d'ordre élevé. En tout cas, remarquons que, même si les deux appareils ne sont pas accordés, il est possible d'avoir encore des effets sensibles à des distances réduites. L'ensemble des deux appareils, excitateur et résonnateur, et le diélectrique qui les sépare constituent, lorsque le système fonctionne, un transport d'énergie sans liaison visible. Ce transport s'effectue dans le diélectrique et dans tous les sens, puisqu'il n'existe pas de conducteur pour *guider* son déplacement. Ce conducteur deviendrait, du reste, presque inutile, puisque, par suite de l'énorme fréquence (de quelques centaines de millions par seconde), une couche extérieure très mince seulement en serait utilisée.

Digitized by Google

Abordons le système télégraphique Marconi. Nous empruntons une description assez complète des appareils employés par l'inventeur, à une belle conférence que M. Preece a donnée à la *Royal Institution*, le 4 juin dernier, à la suite des brillants résultats obtenus dans les essais faits sous sa direction.

Le système se compose d'un appareil transmetteur et d'un appareil récepteur.

Le transmetteur n'est rien d'autre qu'un radiateur de Hertz sous la forme que lui a donnée le professeur Righi (*).

Il se compose de deux sphères solides de laiton de 10 cm de diamètre renfermées à moitié dans une caisse isolante et étanche, remplie d'huile de paraffine. Suivant M. Preece, l'huile a l'avantage de maintenir les surfaces des sphères électriquement propres, donne aux ondes une forme régulière et constante et réduit la longueur d'onde elle-même. Deux petites sphères sont placées en regard des grandes et reliées aux bornes du circuit secondaire d'une bobine d'induction C, dont le circuit primaire, alimenté par une batterie E, peut être fermé par une clef Morse K. Lorsqu'on ferme cette clef, des étincelles se produisent entre les sphères : le système constitue un condensateur dont la décharge est oscillante puisque le circuit de décharge satisfait aux conditions de la formule (1). La fréquence de la décharge dans les appareils Marconi dépend des conditions dans lesquelles ils sont employés

(*) M. Marconi (âgé de 22 ans seulement) est un élève de M. le professeur Righi, de l'Université de Bologne, un des plus illustres savants qui s'occupent du développement de la théorie de Maxwell. Dans le bruit que l'on a fait autour de l'inventeur du télégraphe sans fils on n'a pas trop mêlé le nom du professeur Righi et, à quelque point de vue, c'est peut être bien

Digitized by Google

et elle est toujours de l'ordre des centaines de millions. A l'appareil transmetteur, ainsi qu'au récepteur que nous allons décrire, sont reliés deux longs fils verticaux, auxquels M. Marconi semble attribuer un rôle prépondérant dans l'augmentation de la distance à laquelle la transmission est possible.

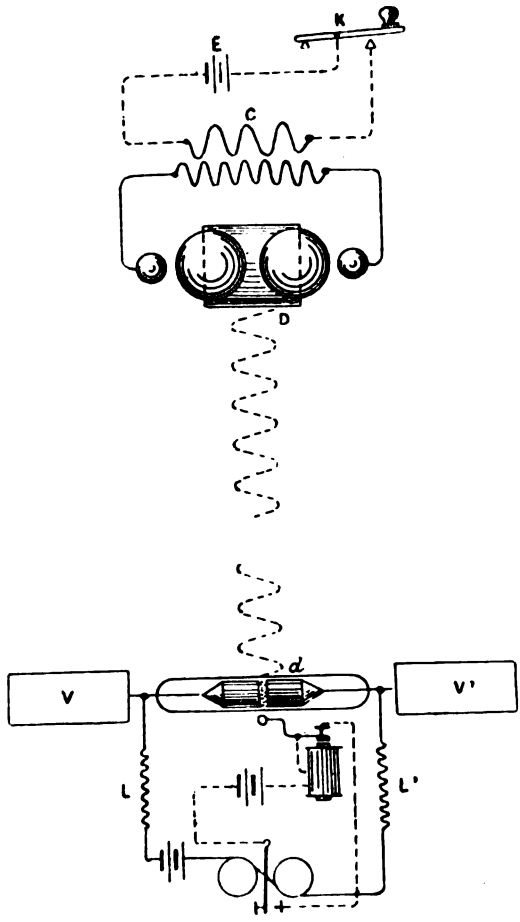


Fig. 1.

Digitized by Google

Le système, constitué par le fil et les sphères, est le siége de courants alternatifs dont la fréquence est égale à celle de la décharge du condensateur; ce sont ces courants qui engendrent les ondes qui excitent l'appareil récepteur. M. Preece a trouvé expérimentalement que la distance à laquelle la transmission est possible dépend de l'énergie de la décharge : ainsi une bobine de 15 cm d'étincelle agit jusqu'à 6 km ; pour des distances plus grandes, il faut des étincelles plus longues, jusqu'à 50 cm de longueur. La distance augmente avec la grosseur des sphères, et se trouve doublée en prenant des sphères pleines.

Le récepteur de M. Marconi est formé d'un petit tube de 4 cm de longueur, dans lequel deux conducteurs cylindriques en argent sont scellés à la lampe après y avoir fait un certain vide : ils sont écartés à une distance d'environ un demi-millimètre, et l'intervalle est rempli de fine limaille de nickel et d'argent, mélangée avec une trace de mercure. Les deux tiges font partie du circuit d'une pile locale qui peut actionner un relais télégraphique ordinaire assez sensible.

Les particules de limaille qui sont pêle-mêle, n'établissent pas un contact métallique continu entre les deux tiges en argent, mais ces particules sont orientées sous l'action des ondes électriques, elles sont polarisées, mises en ordre et, suivant l'expression du professeur Lodge, elles *cohèrent* : alors un contact plus ou moins parfait s'établit entre les deux tiges, et le courant de la pile locale peut circuler et actionner le relais télégraphique. La résistance du petit tube, qui, d'ordinaire, est pratiquement infinie, devient de quelques ohms. M. Preece a soin de faire remarquer que la réduction de la résistance des substances finement divisées est connue depuis 1866. Un phénomène analogue se produit dans le microphone de Hunnings à granules de charbon : il faut souvent l'agiter

Digitized by Google

pour ramener les particules à leur désordre initial. — En 1890, M. E. Brauly a trouvé que la limaille de cuivre, de fer ou d'aluminium agit de même, ce qui tendrait à démontrer que l'orientation est une particularité des matières conductrices. C'est le professeur Lodge qui a perfectionné cet appareil et lui a donné le nom de *cohéreur*, sous lequel il est aujourd'hui universellement connu. Le fonctionnement de cet appareil est analogue à celui des *microphones* dans lesquels la variation de la résistance est due aux ondes sonores; il ressemble aussi au *photophone* à sélénium, dont la résistance varie sous l'action d'un éclairement variable. Ces ressemblances sont remarquables, puisque le son et la lumière, à part l'échelle du phénomène, se transmettent comme les ondes électromagnétiques.

M. Marconi décohère la limaille en utilisant le circuit local à faire vibrer rapidement la tête d'un petit marteau contre le tube de verre, et ces chocs répétés produisent un son qui rend facile la lecture des caractères Morse. Le même courant, employé à décohérer le récepteur, peut également actionner un télégraphe Morse imprimant les signaux sur bande. Le tube se termine par deux volets V V', dont les dimensions sont ajustées pour accorder électriquement le transmetteur et le récepteur. Les bobines de self-induction L L' ont pour effet de s'opposer au passage des ondes électriques en dehors du cohéreur et des volets ou autres conducteurs qui les remplacent.

Les oscillations électriques produites par le transmetteur arrivent sur le récepteur accordé à l'unisson avec elles : la cohérence de la limaille se produit, le courant passe par le cohéreur dans le relais, et les signaux sont ainsi reçus.

Dans l'espace libre entre deux points visibles l'un pour l'autre, il ne faut rien de plus; mais lorsque les obstacles

Digitized by Google

interviennent et qu'il s'agit de grandes distances, il faut employer des mâts, des cerfs-volants ou des ballons reliés aux appareils.

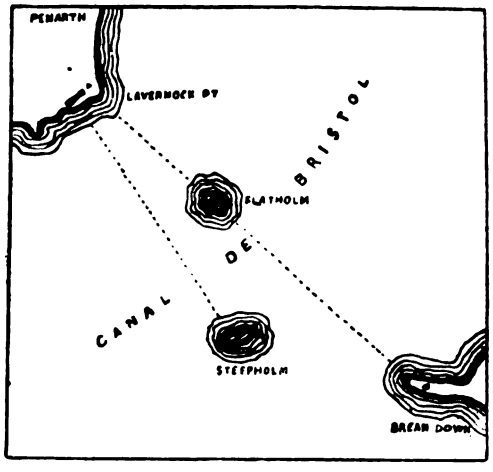


Fig. 2.
• Expériences Marconi ;
— Id. Preece.

Des signaux parfaits ont été échangés entre Penarth et Brean Down, près de Weston-supe-mare (fig. 2) à travers le canal de Bristol, à une distance de 14 kilomètres. Suivant M. Preece, les miroirs aident aux effets et les augmentent, mais on a abandonné leur emploi à cause du prix de fabrication et du temps que demande cette fabrication (*).

C'est un fait curieux, dit M. Preece, que les collines et les obstacles apparents ne s'opposent pas à la propaga-

(*) Ce fait n'a pas été, parait-il, constaté dans les expériences faites en Italie ; au contraire, on aurait reconnu l'inutilité des miroirs et cela serait d'accord avec quelques considérations théoriques que l'on trouvera plus loin.

Digitized by Google

tion ; les lignes de force échappent à tout obstacle (fig. 3). Le temps ne semble également avoir aucune influence : pluie, brouillard, neige et vent se laissent facilement traverser par les ondes électriques.

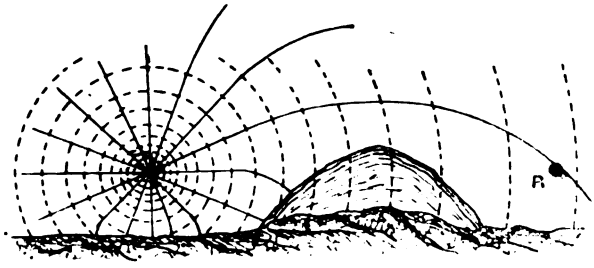


Fig. 3.

Les volets métalliques ajustés au cohéreur, peuvent être supprimés. Un pôle du récepteur peut être relié à la terre et l'autre amené jusqu'au sommet d'un mât ou fixé à un ballon à l'aide d'un fil (fig 4). Le fil et le ballon, ou le cerf-volant, recouverts de papier d'étain, jouent le rôle de volets, mais, dans ce cas, il faut aussi relier à la terre un des pôles du transmetteur. Plusieurs messages peuvent être transmis en même temps dans plusieurs directions à la fois. Il suffit d'accorder le transmetteur et les récepteurs pour la même fréquence.

M. Preece conclut que « bien des points pratiques » sont encore à étudier et à perfectionner avant que le » système puisse être mis sur le marché : mais ce que » nous avons dit prouve sa valeur. Au point de vue des » communications avec les navires et les phares, il cons- » titue un progrès scientifique d'une importance considé- » rable. »

Le système télégraphique Marconi a été expérimenté dernièrement en Italie où le gouvernement, ainsi qu'en

Digitized by Google

Angleterre a été très large pour fournir les moyens de tout genre.

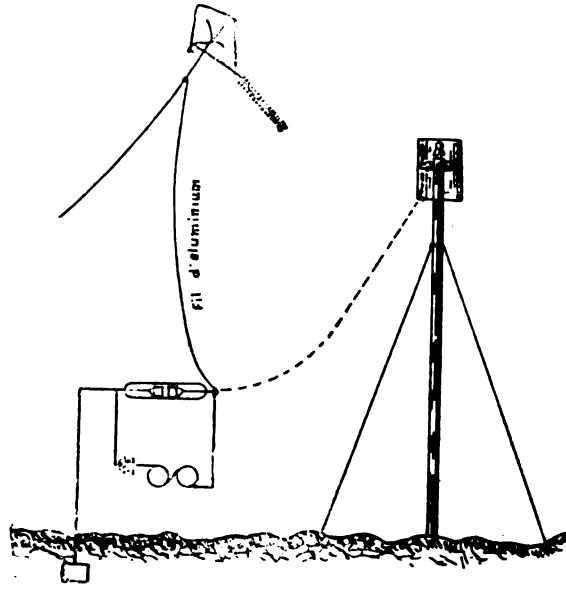


Fig. 4.

La correspondance fut établie entre deux navires et entre les navires et la côte. La distance maxima à laquelle la transmission des signaux a été possible est de 18 kilomètres en employant un conducteur vertical de la hauteur de 25 mètres. Cela a permis de réduire la puissance de la bobine d'induction qui a été sensiblement moindre que celle employée en Angleterre, où la distance maxima ne dépassa pas 14 kilomètres.

Le cuirassé *San Martino*, sur lequel on avait établi une des stations, était complètement armé, et l'on n'a remarqué aucun changement pour la cause. Que les appareils fussent placés sur le pont ou à l'intérieur du cuirassé, la transmission se faisait également bien.

Digitized by Google

On prétend que le beau soleil d'Italie aurait contribué à augmenter la distance de transmission.

Essayons de nous rendre compte, au moins grossièrement, du mode de fonctionnement du système télégraphique Marconi et des différentes remarques auxquelles ont donné lieu les essais qui ont été faits jusqu'à présent.

L'oscillateur de M. Righi, qui est le transmetteur dans le système télégraphique Marconi, est une forme spéciale des oscillateurs de Hertz. Lorsque la décharge oscillante y est provoquée, il devient le siége d'un courant alternatif dont le circuit est fermé, de même qu'est fermé un circuit métallique comprenant une source de force électro-motrice alternative et un condensateur. L'étincelle oscillant très rapidement (quelques centaines de millions de fois par seconde) détermine l'ondulation de l'éther qui se propage dans tous les sens. En outre, les diverses parties de l'excitateur provoquent des oscillations propres qui se superposent à l'onde fondamentale et la modifient plus ou moins. La quantité d'électricité oscillante, qui constitue le courant, se déplace sur les conducteurs qui de la sorte sont alternativement chargés de signe contraire.

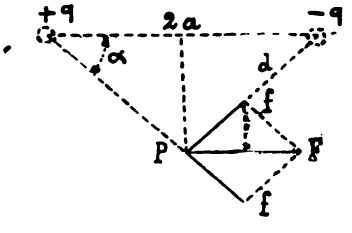
En un point quelconque du diélectrique ambiant existe une force électrostatique due aux masses électriques qui se trouvent sur l'excitateur à un instant quelconque: cette force, que l'on peut exprimer par la loi de Coulomb, agit dans un plan comprenant le point considéré et les deux masses de signe contraire équivalentes à celles qui se trouvent sur l'excitateur à l'instant considéré. En outre, le courant alternatif de l'excitateur engendre autour de lui un champ magnétique dont la direction, au point considéré, ne coïncide pas, en général, avec celle de la force électrostatique. Si l'excitateur est rectiligne, les deux forces susdites sont normales entre elles ; en tout cas, au

Digitized by Google

point considéré, le champ est la résultante de la force électrostatique et de la force électromagnétique.

La force électrostatique, toutefois, diminue en raison du cube de la distance, tandis que la force électromagnétique diminue avec la simple puissance de la distance (*). Il s'en suit que la force électrostatique devient sensiblement nulle à une très faible distance. Si on ajoute encore que la capacité du circuit de décharge est nécessairement faible, on en conclut, avec certitude, qu'aux distances relativement grandes auxquelles se trouve toujours le récepteur du télégraphe Marconi, il ne reste sensiblement que la force électromagnétique. Si le long fil relié à l'excitateur est vertical, le champ au poste récepteur sera horizontal : la transmission entre les deux appareils se fait donc par induction mutuelle entre les deux fils. On s'explique que l'on puisse obtenir des effets sensibles à une distance de plusieurs kilomètres, par la fréquence énorme du courant qui circule dans l'excitateur.

(*) On peut démontrer facilement que la force électrostatique due à des masses égales et de signe contraire varie avec le cube de la distance. On a, en effet,



$$F = 2 f \cos \alpha = \frac{2 K q}{d^2} \cos \alpha = \frac{2 K q a}{d^3}$$

Digitized by Google

On remarquera, en effet, que si la longueur des ondes est, par exemple, de 1 20 m, la fréquence est 250 10^6 périodes par seconde. La valeur de la force électromotrice induite étant directement proportionnelle à la fréquence et au champ, la fréquence est donc à même de compenser la petitesse de ce dernier.

Si le phénomène, au moins dans ses lignes générales, se passe comme nous venons de l'indiquer, le circuit inducteur (excitateur) et le circuit induit (récepteur) sont fermés par l'intermédiaire de leur capacité. On ne s'explique pas alors la nécessité de relier un des pôles des deux appareils à la terre, à moins que cela n'ait pour effet de varier la capacité et la self-induction des deux appareils : dans ce cas, il est nécessaire de les relier *tous les deux* à la terre pour qu'ils puissent rester accordés. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait admettre que les deux appareils et le diélectrique constituent une transmission avec retour par la terre, dans laquelle transmission on ait supprimé le conducteur. Cette hypothèse, à première vue, ne nous semble pas admissible.

Il n'est pas sans importance de rappeler que ce n'est pas la première fois que l'on essaie de supprimer les fils dans la transmission télégraphique. M. Preece, dans sa conférence, nous apprend qu'en 1884, les télégrammes envoyés à travers des fils isolés, placés dans des tubes en fer enterrés dans les rues de Londres, ont été lus sur des circuits téléphoniques placés à 24 m de distance. Des conversations téléphoniques distinctes ont été transmises à travers un quartier, sur des distances de 1 600 et 2 000 m. En 1892, M Preece a installé un système complet permettant de transmettre des signaux distincts entre Pennarth et Flat-Holm, à travers le canal de Bristol, à la distance de 5,3 km, au même endroit où on a essayé le télégraphe Marconi (voir fig. 2). Finalement, en 1895, le

Digitized by Google

câble entre Oban et l'île de Mull se rompit, et la communication fut rétablie à l'aide de deux fils parallèles horizontaux agissant entre eux par induction ; les deux fils avaient leurs extrémités à la terre, qui fermait les circuits. Les variations du courant dans le primaire étaient produites par une sorte d'interrupteur à roue actionné par un moteur électrique; on avait ainsi 260 pulsations par 1". Sur l'autre circuit (le secondaire) fonctionnait comme récepteur le téléphone. M. Preece affirme que *lorsque rien ne s'interposait* entre les deux circuits, le système fonctionnait jusqu'à 8 km de distance. On voit aisément que ce genre de télégraphie ne diffère pas essentiellement de celui de Marconi; que l'on multiplie par un million la fréquence, en remplaçant le courant pulsatoire par un courant alternatif et qu'on mette les deux fils verticalement au lieu de les disposer horizontalement, et on aura le système Marconi. Mais comment réaliser tout cela? C'est le mérite de M. Marconi de l'avoir trouvé.

Si c'est exclusivement par induction que les deux appareils Marconi sont reliés, on peut se rendre compte, au moins qualitativement, de l'efficacité et de la portée du système par la considération du coefficient d'induction mutuelle (*).

Toutes choses égales le courant induit est proportionnel à ce coefficient, qui a pour expression

$$M = \int\int \frac{ds\, ds' \cos \varepsilon}{r} \ldots (2)$$

dans laquelle ds et ds' sont les éléments des deux circuits, ε l'angle qu'ils font entre eux et r leur distance. Pour les

(*) Voir dans l'*Elettricista* du 1er août 1897 l'artice de M. Ascoli sur le télégraphe Marconi.

Digitized by Google

appareils Marconi à fils verticaux (supposés parallèles). $\varepsilon = o$ $r =$ constante, et on a

$$M = \frac{h^2}{r} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

h étant la hauteur des fils. La formule (2) se réduit à la précédente si le courant, à un instant quelconque, a le même signe en tout point de chaque appareil, ce qui ne peut pas être admis *a priori*. La distance de transmission pour des appareils d'une sensibilité donnée croîtrait donc suivant le carré de la hauteur des fils reliés aux appareils. Mais il faut remarquer qu'en augmentant la longueur des fils on augmente leur self-induction et leur capacité, ce qui, suivant la formule

$$T = \frac{\pi\sqrt{cL}}{v} \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

(v = vitesse de la lumière, T durée d'une ondulation) augmente la durée de l'ondulation et diminue la fréquence. Si on veut donc que la portée des appareils varie proportionnellement au carré de la hauteur des fils, il faut augmenter le courant primaire, c'est à dire l'énergie de la décharge.

La force électro-magnétique est horizontale, si les fils des appareils sont verticaux ; il s'en suit que la transmission entre les appareils Marconi ne peut pas être gênée par les conducteurs sensiblement horizontaux : fils téléphoniques, télégraphiques, etc. . . Mais les conducteurs verticaux pourraient troubler sérieusement cette transmission ; on sait, en effet, que Hertz a montré qu'un cadre de fils parallèles tendus, disposé convenablement par rapport aux ondes, arrête celle-ci Comme toutes

Digitized by Google

choses égales, les forces électromotrices induites sont inversement proportionnelles à la distance, entre deux appareils récepteurs identiques placés à des distances inégales, le plus rapproché absorbera beaucoup plus d'énergie que le plus éloigné, et si la disproportion entre les distances est grande, la réception pourrait être impossible pour l'appareil le plus éloigné ; cette réception pourrait être très possible si le premier appareil n'existait pas.

Le fait que les parties métalliques du cuirassé *San Martino* n'aient pas eu d'influence sur la transmission, s'explique par la hauteur relativement grande des fils verticaux par rapport à celles des parties métalliques, qui, d'ailleurs, n'étaient pas à même de *résonner* avec le transmetteur. En tout cas, il est certain que, comme les ondes électromagnétiques se propagent dans tous les sens, l'énergie est à même de se transmettre dans tous les sens, si ces ondes rencontrent des conducteurs pouvant fonctionner comme récepteurs (et tous les conducteurs sont à même de le faire plus ou moins bien), la transmission entre les deux appareils se fera à mauvais rendement.

Au point de vue de la longueur, les ondes employées par M. Marconi ressemblent beaucoup aux ondes sonores ; la différence n'existe que pour la vitesse de transmission, qui est environ un million de fois plus forte pour les ondes électromagnétiques. On explique alors l'apparent passage des ondes à travers les obstacles : le phénomène analogue pour les ondes sonores nous est familier ; les ondes électromagnétiques doivent cependant être arrêtées par les masses métalliques. On explique en même temps le peu d'efficacité des miroirs ; ces appareils ne servent presque pas en acoustique. Hertz, du reste, déclare avoir essayé inutilement l'usage des miroirs pour des ondes de 7 m de longueur (les ondes données par les

Digitized by Google

appareils Marconi sont encore plus longues, surtout si on augmente la hauteur des fils verticaux) ; il en a obtenu plutôt des désavantages, probablement parce que les miroirs absorbaient une partie de l'énergie de l'excitateur.

Pour que les miroirs puissent être employés avantageusement, il faudrait réduire très sensiblement la longueur d'onde, ils pourraient alors au moins compenser la diminution de la portée utile des appareils, qui serait la conséquence de la dite réduction, cette portée étant toujours mesurée sans miroirs. Par contre, on aurait l'avantage très considérable de pouvoir diriger le faisceau des ondes de la même façon que l'on dirige les faisceaux lumineux, et faire en quelque sorte de la télégraphie analogue à la télégraphie optique. Mais, en pratique, il faudrait encore vaincre ou éviter la difficulté d'avoir et d'employer des miroirs dont la grandeur serait probablement de l'ordre de la hauteur des fils verticaux reliés aux appareils Marconi.

Il est inutile de montrer que la propagation dans tous les sens est l'obstacle principal qui s'oppose à l'application pratique du système Marconi, tel qu'il est actuellement. Il est vrai que l'on peut empêcher les réceptions multiples par des postes accordés pour des fréquences différentes : il n'est cependant pas moins vrai que l'on peut en tâtonnant et très-simplement accorder un récepteur avec un transmetteur que l'on suppose dans le rayon de la portée utile des appareils : la formule (4) en indique les moyens.

On a discuté dernièrement dans quelques revues la nouveauté des appareils Marconi. Certainement tous les éléments de ces appareils pris un par un sont connus depuis longtemps, mais les avoir combinés et utilisés de façon à atteindre le but est une véritable invention nou-

Digitized by Google

velle dans toute l'étendue des mots. On doit remarquer encore que les fils verticaux ajoutés aux appareils et auxquels, comme nous venons de voir, est due principalement l'augmentation de la distance de transmission, constituent une disposition qui est appliquée pour la première fois.

Les applications que le système télégraphique Marconi pourrait avoir sont très nombreuses; en les énumérant on se laisserait aisément emporter par l'imagination au delà les frontières de la réalité. Cela prouve, en tout cas, qu'il y a beaucoup à chercher et que le problème posé et résolu aussi brillamment par M. Marconi peut être la source d'autres inventions et perfectionnements de même nature. Il n'y a nul doute que beaucoup d'esprits théoriques et pratiques seront attirés par la surprenante beauté du problème et que, dans quelques temps, les idées et les perfectionnements ne manqueront pas de sortir, surtout si on réussit à enlever le mystère et l'empirisme qui environne encore la nouvelle invention. Le siècle des découvertes se terminera ainsi par un nouveau progrès considérable.

Il restera toujours, cependant, au jeune Marconi le très grand mérite d'avoir, le premier, vu et réalisé une solution du grand problème, quand même cette solution pourrait être considérée comme imparfaite.

(*Applaudissements*).

M. L'Hoest, communique ensuite la note suivante:

Sur le Block system Westinghouse.

M. Steels nous a donné, dans le courant de l'année, une description très complète du Block system automatique de Hall, dont l'emploi s'est répandu en Amérique et qui est actuellement à l'essai sur une voie ferrée belge.

Digitized by Google

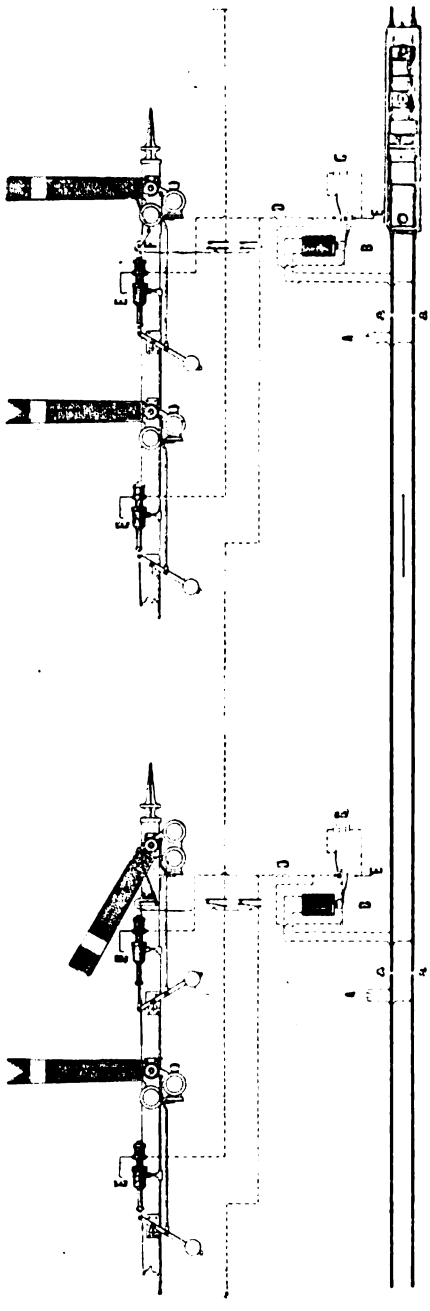


Fig. 1.

Digitized by Google

Une maison américaine qui s'est acquis une renommée universelle dans la construction des freins, la firme Westinghouse, a produit aussi un genre de Block system automatique qui présente une certaine analogie avec celui de Hall.

Dans l'un et l'autre systèmes, en effet, un courant constant circule dans la section de voie à protéger, en partant par une file de rails et revenant par l'autre vers la source A. Cette source, une pile à faible tension, est raccordée aux rails à la sortie de la voie à protéger; du côté de l'entrée, les rails sont réunis par l'intermédiaire d'un relai B, dont l'armature est normalement attirée. Si un train pénètre sur la section, la première paire de roues met les rails en court-circuit par rapport au relai et l'armature de celui-ci tombe; de même, si un bris de rail se produit, le courant est interrompu et le relai cesse de fonctionner.

L'attraction de l'armature du relai, qui ferme le circuit de la pile C du poste, donne donc la garantie que la voie est libre et entière.

Ce dispositif est commun aux deux systèmes qui nous occupent; dans l'un comme dans l'autre, d'ailleurs, il nécessite, d'une part, l'isolement électrique des rails aux éclissages terminaux *a, a* des sections ; d'autre part, la liaison électrique des rails dans chaque file de la section, comme il est d'usage de le faire pour les circuits de retour des tramways électriques.

Cette analogie ne s'étend pas toutefois au-delà du relai. Dans le système Hall, le courant fourni par le relai actionne directement des signaux de construction toute spéciale; dans le système Westinghouse, il commande seulement les distributeurs d'un cylindre à air comprimé dont le piston manœuvre des signaux ordinaires.

Il est évident que le système Westinghouse, qui exige

Digitized by Google

une machinerie de compression et une conduite d'air régnant sur toute la longueur des voies, est plus coûteux que le système Hall; par contre, il présente l'avantage de n'exiger aucun appareil délicat pour la manœuvre et s'accomode de toutes espèces de signaux en usage. L'influence du coût des conduites d'air et des usines de compression, dont l'étendue d'alimentation n'est pas illimitée, est d'autant plus sensible que les sections sont longues, c'est-à-dire que la capacité de la ligne est faible. On peut donc dire *a priori* que le système Westinghouse est d'autant plus avantageux que les sections sont courtes, c'est-à-dire que le mouvement est intense. Cette influence est moins sensible dans le système Hall, où la liaison électrique des rails est la seule dépense qui varie avec l'étendue des sections.

Sur des lignes très chargées, on a grand intérêt à multiplier les sections en les raccourcissant, afin de cantonner un grand nombre de trains; on est toutefois limité dans cette réduction des longueurs de section, parce que du signal de protection jusqu'au train protégé il doit toujours exister une étendue de voie suffisante pour qu'un train survenant puisse y amortir complètement sa vitesse.

C'est pourquoi, il est d'usage en Belgique de ne libérer une section de block que lorsque le train à couvrir a déjà pénétré de 700 mètres sur la section suivante. On conçoit que les signaux du block doivent avoir normalement un espacement d'au moins cette longueur.

Il est un moyen de raccourcir toutefois les sections en faisant usage de signaux d'avertissement qui, à l'origine d'une section, indiquent si la section prochaine est bloquée. C'est cette disposition que le Block system Westinghouse a réalisée.

Voici, brièvement exposés, les différents appareils de ce système.

Digitized by Google

Le sémaphore est à deux palettes, la supérieure commandant la section à l'entrée de laquelle le signal est planté, l'inférieure découpée en oriflamme, répétant l'indication de la palette d'entrée du poste suivant.

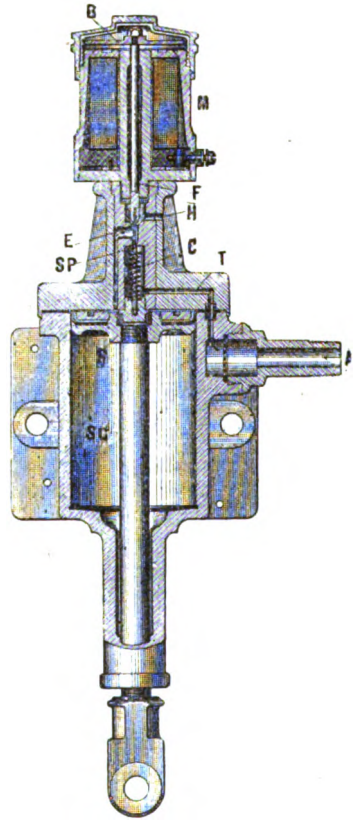


Fig 2

Pour éviter toute confusion dangereuse, la palette répétante est toujours à l'arrêt (position horizontale) lorsque la palette d'entrée du même sémaphore est à l'arrêt. Ce

Digitized by Google

n'est donc, à proprement parler, que lorsque la palette d'entrée (home) est au passage (position inclinée) que la palette répétante (distant) reproduit le signal d'entrée de la section suivante.

Les palettes sont munies de lunettes mobiles et d'une lanterne fixe pour donner les signaux de nuit; elles sont équilibrées par contrepoids afin de retomber à l'arrêt lorsqu'elles sont laissées à la seule action de la pesanteur.

L'appareil à air comprimé agit de haut en bas sur le levier du contrepoids pour mettre la palette au passage; cet appareil consiste en un cylindre S C à simple effet dans lequel l'air comprimé presse sur la face supérieure du piston P dont la tige, dirigée vers le bas, est reliée au levier du contrepoids.

L'admission et l'émission de l'air sont réglées par un distributeur commandé par l'électro-aimant M qu'excite le courant du relai.

L'armature circulaire B est fixée sur une tige F qui traverse l'électro et forme, à son extrémité inférieure, un obturateur qui retombe sur son siège quand l'armature est attirée. Lorsque cet obturateur est soulevé, la partie supérieure du cylindre moteur S C est mise en communication avec l'extérieur par les conduits E et H; lorsqu'il retombe, cette communication est interrompue.

D'autre part, l'air comprimé de la conduite, qui règne le long de la voie, pénètre dans l'appareil par le tuyau A, passe par le conduit T dans la chambre C où se trouve une soupape S P pressée par un ressort contre son siége, ouvert à la partie supérieure de la chambre. La tige de la soupape s'engage dans la tige de l'armature, dont elle forme le prolongement. Quand l'armature abaissée ferme l'obturateur E, la soupape S P est abaissée et admet l'air comprimé par le conduit E sur le piston, ce piston descend et met le signal au passage. Par contre, quand l'électro

Digitized by Google

n'est plus excité, le ressort à boudin de la soupape S P repousse les tiges et l'armature ; la soupape S P se ferme, l'obturateur s'ouvre et le cylindre se vide. Sous l'action du contrepoids, le piston remonte et le signal se met à l'arrêt.

En résumé, le signal se met au passage lorsque l'électro est excité par le courant du relai et retombe à l'arrêt lorsque le courant est interrompu. En se reportant au mode de fonctionnement du relai, on voit que le signal est au passage quand la section est libre et qu'il se remet à l'arrêt lorsqu'un train la parcourt ou que le circuit de ligne est interrompu.

La palette d'entrée d'une section en s'inclinant fait mouvoir un commutateur F représenté schématiquement dans la fig. 1. Il établit ainsi le circuit de la palette répétante d'aval, placée sur le même sémaphore, et celui du circuit de la palette répétante se rapportant à la section même et qui est installée sur le sémaphore d'amont.

Lorsque la palette d'entrée est à l'arrêt, ce même commutateur F ouvre les deux circuits ; ainsi est réalisée la condition que nous avons énoncée, à savoir que, sur un même sémaphore, les deux palettes sont à l'arrêt, lorsque la section considérée n'est pas libre, alors même que la section suivante le serait.

A première vue, il peut paraître étonnant que la Cie Westinghouse, qui a poussé presque jusqu'à la perfection l'étude et la construction des appareils à air comprimé, ait eu recours à l'électricité, comme auxiliaire, pour son système de signaux.

Mais en examinant la chose de plus près, on reconnaîtra que l'emploi de l'air comprimé, outre qu'il n'aurait pas permis de réaliser l'automaticité, aurait entraîné pour la commande des distributeurs à distance une consomma-

Digitized by Google

tion d'air considérable et des lenteurs inévitables dans la transmission.

Si nous imaginons, en effet, que la commande du distributeur est réalisée par un piston, dont le déplacement résulte des variations de pression que l'on crée à distance dans la conduite, tout le volume de cette conduite constitue un *espace nuisible* démesurément grand, qui rend la manœuvre lente et coûteuse.

Dans des appareils analogues qu'elle construisait primitivement, la Cie Westinghouse avait recours à un fluide incompressible pour la transmission de la commande, l'air comprimé restant toujours l'agent de manœuvre.

L'emploi de l'électricité lui a fait réaliser une très grande économie d'exploitation et d'installation, une simplification considérable et des garanties nouvelles, notamment celle de l'automaticité.

Les avantages de la commande électrique, à savoir l'économie de consommation et la rapidité de transmission, ont fait adopter aussi cette commande pour les appareils de conjugaison des aiguilles et des signaux que la Cie Westinghouse fait mouvoir par l'air comprimé.

Sans doute, elle se préoccupe de l'introduire dans son système de freins continus qui serait ainsi porté au plus haut degré de perfection. *(Applaudissements.)*

MM. de Merona Xavier, et Namba Massashi, présentés, par MM. De Bast, Del Proposto et L'Hoest, sont ensuite élus membres effectifs de l'Association.

La séance est levée à midi.

Digitized by Google

Construction des lignes de tramways à traction électrique.

(Suite de la communication de M. Van Kesteren, fascicule 5, 6, 7, 8 de 1897, pages 195 à 244.)

Usines centrales. — Le choix de l'emplacement de l'usine centrale de production de l'énergie ne peut, dans la majorité des cas, se baser sur les considérations d'économie de transport de la puissance à fournir. Il est généralement dicté par les conditions locales spéciales ayant rapport à l'approvisionnement des matières premières et *au commodo* et *à l'incommodo* d'une installation de force motrice. Quand on n'est pas astreint à devoir fixer son choix dans un rayon limité, il est évident que le meilleur emplacement sera celui qui donnera lieu à un rendement global maximum ; c'est-à-dire, celui qui réunira les conditions les plus économiques de transport de l'énergie aux plus grandes facilités d'approvisionnements de combustible, etc. Ces dernières dépendent des conditions locales, tandis que les conditions économiques de transport de l'énergie se rattachent aux répartitions des courants dans le réseau. La distribution de la puissance sur la ligne doit être telle que la perte de tension ne dépasse pas 75 volts pour une pression initiale à l'usine de 500 volts. On remarque, en effet, que les moteurs des voitures automotrices crachent beaucoup si l'on descend en-dessous de 425 volts avec un courant s'approchant de celui nécessaire au travail normal. Il faut donc faire en sorte que la chute de tension ne soit pas supérieure à 75 volts aux commencements des pentes, aux endroits d'arrêt et de fort trafic, etc., sinon, on s'expose à une détérioration rapide du matériel électrique roulant.

Digitized by Google

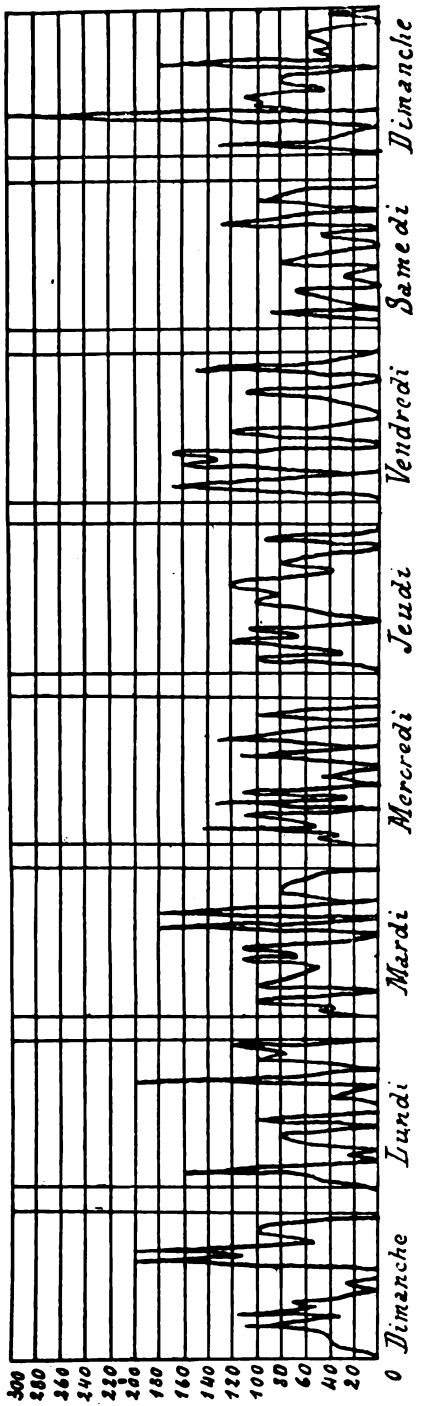


Fig. 6. — Abs : jours ; ord : ampères.

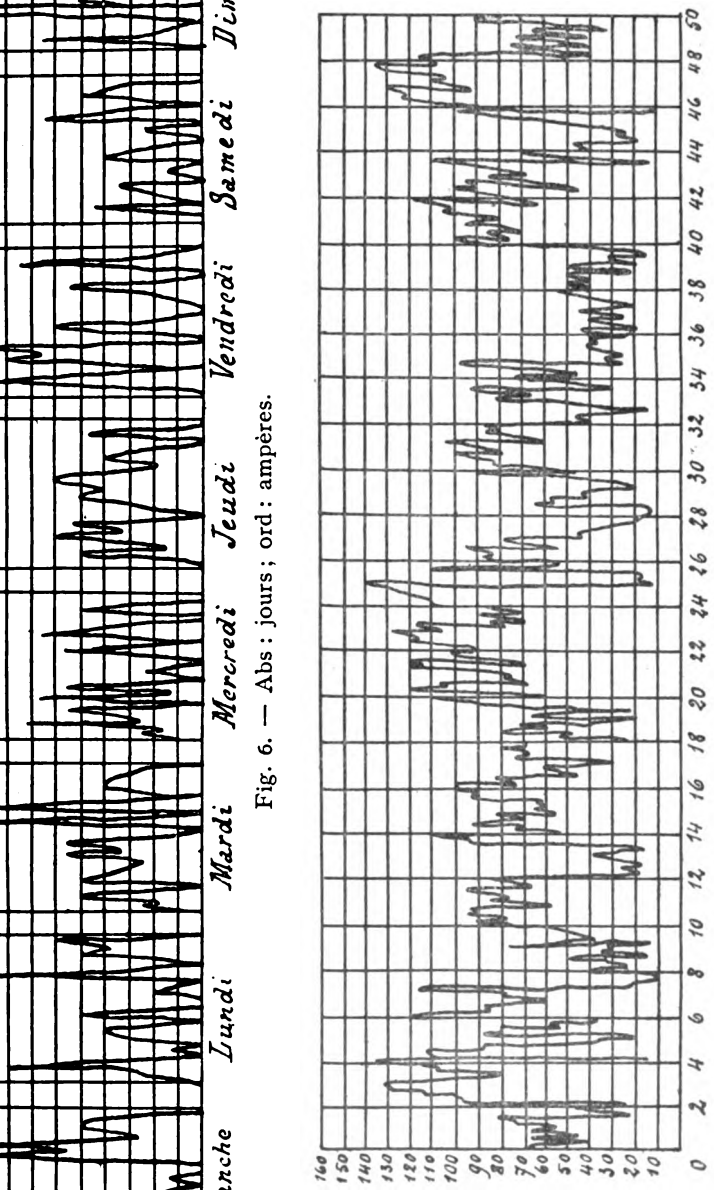


Fig. 7. — Abs : secondes ; ord : ampères.

Digitized by Google

Le choix de l'endroit où s'érigera l'usine étant déterminé, il faut rechercher le nombre des unités nécessaires à la production de l'énergie. Comme il a été expliqué ci-dessus, il est bien difficile d'arriver par le calcul à une estimation approchée du total de chevaux électriques à produire à l'usine; mieux vaut procéder par comparaisons avec des lignes existantes et tirer d'un examen minutieux les conclusions nécessaires. Les figures 6, 7, 8, 9, 22, 23 et 24 donnent une idée des variations brusques des demandes d'énergie aux usines centrales de tramways.

Les diagrammes 8 et 9, empruntés à un article du camarade Dawson, paru dans l'*Engineering* de l'année dernière, sont particulièrement intéressants. Ils se rapportent aux tramways électriques de Zürich et montrent le parti qu'on peut tirer de l'emploi des accumulateurs comme régulateurs de débit. La figure 8, en effet, indique le courant fourni par les génératrices, tandis que la fig. 9 donne la consommation totale de courant. L'installation des tramways de Zurich, dont il vient d'être question, comporte une batterie d'accumulateurs placés en dérivation sur la ligne principale. Un dispositif semblable a été proposé en Amérique pour utiliser la puissance fournie par les chutes du Niagara; le projet renferme en plus une dynamo auxiliaire faisant emploi de survolteur. A Zurich, on s'est dispensé de cette complication.

La fig. 6 démontre non seulement l'existence de grands écarts de courant pendant une journée, mais accuse des variations considérables d'un jour à un autre, ce qui conduit à installer à l'usine centrale plusieurs unités de forces différentes, dans le but de pouvoir faire fonctionner chacune d'elles aux environs du degré d'économie maximum.

Dans l'intérêt de faciliter la conduite et les réparations des appareils producteurs d'énergie, il est évidemment

Digitized by Google

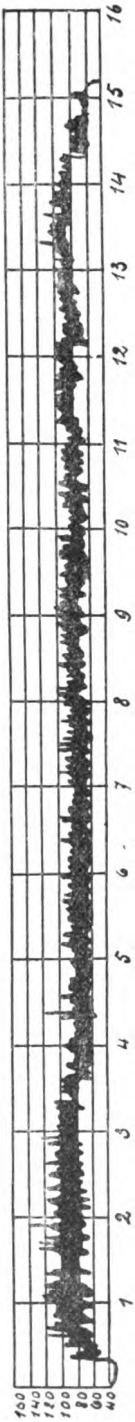


Fig. 8. — Abs : heures ; ord : ampères.

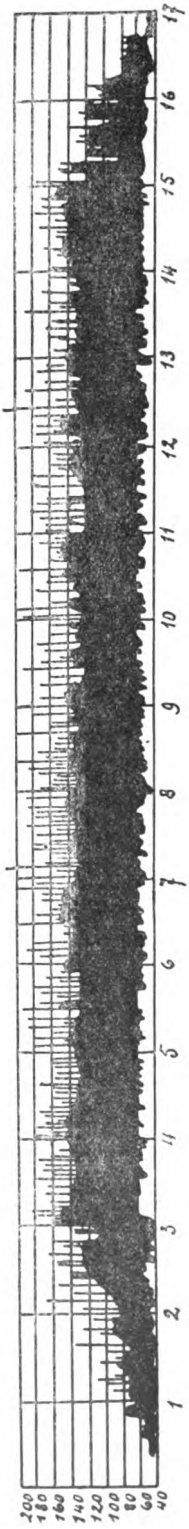


Fig. 9. — Abs : heures ; ord : ampères

Digitized by Google

désirable d'adopter, pour la même usine centrale, le même système dont on choisira des types de forces inégales.

L'addition d'accumulateurs permet, dans bien des cas, de simplifier le problème de la subdivision de la force motrice totale nécessaire en plusieurs facteurs de grandeurs différentes, ce qui assure un meilleur rendement à l'ensemble de l'installation et facilite davantage les réparations.

Dans la détermination du nombre des unités productrices nécessaires, il faut parer aux éventualités d'une consommation extraordinaire de courant et d'une mise hors service d'une partie du matériel de l'usine; pour se mettre à l'abri des effets fâcheux causés par ces imprévus, il est prudent de compter sur une réserve de 30 à 35 % de la puissance motrice nécessaire.

Comme agents physiques, destinés à engendrer par leurs transformations l'énergie requise, on peut faire usage d'eau, de gaz, de vapeur, et, ce qui peut paraître une anomalie, l'électricité est quelquefois utilisée comme force productrice.

Il y a des cas, en effet, où les autorités n'accordent les concessions pour l'établissement de la traction électrique, qu'à la condition que l'exploitant de la ligne s'engage à utiliser, comme force motrice, l'électricité empruntée au réseau urbain et dont le prix de vente est réglé par l'administration compétente.

Celle-ci, en somme, donne satisfaction à l'exploitant, au point de vue de sa demande de concession, d'une part, mais, elle se réserve un certain avantage financier, d'autre part, en vendant l'énergie électrique qu'elle produit pour d'autres usages publics au taux fixé. La tension d'une distribution urbaine étant généralement différente de celle utilisée pour la traction électrique, l'exploitant de la ligne se trouve dans l'obligation de faire usage de transforma-

Digitized by Google

teurs. Quelquefois même les clauses du cahier des charges imposé par les autorités sont telles que l'usine centrale doit être munie de batteries d'accumulateurs destinés, soit à régulariser le débit du réseau urbain, soit à se prémunir contre l'éventualité d'un arrêt dans la production de l'électricité dans le réseau urbain.

On conçoit que l'emploi de l'électricité, comme mode de production de l'énergie dans les stations centrales, est restreint; on n'y recourt que contraint par les circonstances, parce que le prix auquel les administrations vendent le courant électrique est généralement supérieur au prix de sa production par l'exploitant même.

M. Raworth, dans une communication faite à l'Institut des Ingénieurs électriciens Anglais, établit que le maximum du coût de production dans une station centrale bien organisée du kw-heure ne dépasse pas fr. 0,10, tandis que les municipalités fournissent l'énergie à un taux supérieur, comme le montrent les chiffres suivants :

Hambourg.	fr.	0,13
Genève	»	0,12
Rome	»	0,186

Pour obtenir le prix de revient réel du kw-heure, il faut diviser les chiffres ci-dessus par le coefficient de rendement de la transformation du courant électrique fourni en courant utilisable sur le réseau de la ligne à exploiter.

Si l'on tient compte du fait que le prix du kw-heure intervient pour une large part dans l'évaluation du coût d'exploitation par vkm et dont la moyenne est d'environ 0,42 fr., on comprend que l'utilisation de l'énergie électrique d'un réseau urbain comme mode de production de puissance pour la traction est, dans la majorité des cas, une affaire peu brillante au point de vue de l'économie.

Digitized by Google

L'emploi des moteurs à eau est nécessairement très limité et exige, au surplus, l'addition de batteries d'accumulateurs.

D'après M. Koerting, les machines à gaz produisent un effet utile beaucoup plus considérable que les machines à vapeur ; il cite les résultats des essais qu'il a effectués sur des machines à vapeur et à gaz ; ces dernières utilisaient soit le gaz d'éclairage, soit le gaz pauvre. Voici les effets utiles obtenus dans les différents cas :

Puissance indiquée du moteur.	Machine à vapeur.	Machine utilisant le gaz d'éclairage.	Machine utilisant le gaz pauvre.
10 chevaux.	2,2 %	9,1 %	7,3 %
50 »	4,6 %	9,9 %	10,2 %
100 »	6,9 %	10,9 %	12,9 %

D'autre part, il n'en est pas moins vrai que, malgré la supériorité de leurs effets utiles thermiques, les machines à gaz se trouvent dans une infériorité pratique très grande vis-à-vis des moteurs à vapeur. Aussi emploie-t-on généralement ceux-ci dans les usines centrales pour traction électrique.

La machine à vapeur devant se plier aux brusques variations de charge indiquées par les figures 6, 7, 22, 23 et 24, doit posséder un dispositif de réglage automatique lui permettant de fonctionner d'une manière aussi parfaite que possible. Si les variations brusques de courant ne se produisent que pendant l'intervalle d'une révolution du volant de la machine, il s'agirait de proportionner celui-ci de manière à assurer une régularité satisfaisante à la marche du moteur.

Mais, du moment que ces variations de charge per-

Digitized by Google

sistent pendant quelques tours, le problème de la recherche du moyen de réglage assurant la régularité voulue et procurant le plus d'économie de vapeur, se complique.

C'est au capitaine Sankey qu'on est en grande partie redevable de la solution théorique du problème. La pratique confirme en majeure partie les déductions théoriques de cet ingénieur, qui, dans ses recherches, s'est basé sur les belles expériences de Willans exécutées en 1891.

La régularisation de la marche d'un moteur à vapeur a pour but de maintenir aussi constante que possible la tension de distribution sur la ligne, malgré les fortes et brusques variations dans la dépense de courant.

Dans ce but, on maintient la vitesse de la machine entre d'étroites limites, soit en agissant sur la valve d'entrée de vapeur, soit en faisant varier la distribution.

L'action sur la valve d'arrivée de vapeur modifie la pression dans la chapelle de distribution sans modifier cette dernière : c'est la méthode de régularisation par étranglement ou par expansion constante ; tandis que la variation de la distribution ne change en rien la pression disponible dans la chapelle, mais occasionne un changement dans le degré de détente, c'est la méthode de régularisation par expansion variable.

Les deux moyens indiqués, quoique concourant au même but, sont différents dans leurs effets au point de vue de l'économie dans la consommation de vapeur.

En effet, considérons une machine étalon, c'est-à-dire une machine qui possède une vitesse angulaire telle qu'une livre anglaise par pouce carré (soit environ 0,0703 kg par cmq) de pression moyenne donne un cheval-vapeur indiqué, la machine ayant une admission à pression constante, unedétente adiabatique, une émission instantanée, pas de contrepression, pas de compression et aucun

Digitized by Google

espace mort. M. Willans a montré que, dans ces conditions et dans le cas d'une expansion constante, la courbe des consommations d'eau par heure en fonction de la pression moyenne fournie par le diagramme d'indicateur est théoriquement une droite et pratiquement une courbe aplatie très rapprochée de la droite théorique avec laquelle elle tend à se confondre. (Voir fig. 10 et 11.)

La loi de la consommation d'eau pour une machine à expansion variable est représentée par une courbe dont la convexité est tournée vers l'axe des pressions moyennes absolues.

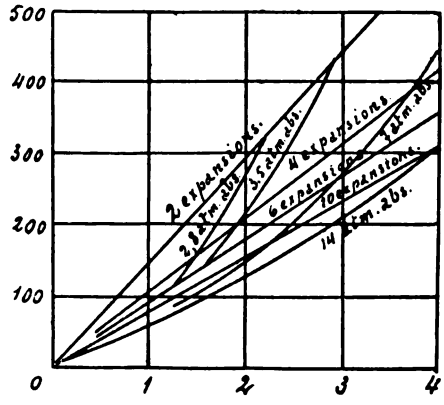


Fig. 10. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h. Machine théorique fournissant un cheval indiqué par 0,703 kgs par cmq de pression absolue.

Les fig. 10 et 11 indiquent quelques droites de Willans et quelques courbes pour des degrés de détente et des pressions initiales absolues variables ; comme il a été déjà dit, ces diagrammes se rapportent à des machines théoriques. Pour pouvoir les appliquer dans une certaine mesure aux machines à expansion fixe existantes, il suffit de tenir compte d'une certaine contrepression, ce qui

Digitized by Google

revient à considérer une pression moyenne absolue moindre. A cet effet, on reculera l'axe des consommations totales d'eau par heure d'une certaine quantité vers la droite, indiquant à l'échelle la contrepression en kg par cmq. En supposant que celle-ci soit de 0,5 kg par cmq, on mènera par le point A (voir fig. 11) une parallèle à l'axe des consommations et l'on aura en A B le nouvel axe des ordonnées. L'inspection de la fig. 9 montre que, pour les machines à degré de détente constant, il y a peu d'avantages à augmenter le nombre des expansions au-delà de certaines limites. La pratique indique en moyenne 5 à 6 expansions comme suffisantes ; elle ne permet que difficilement d'aller au-delà.

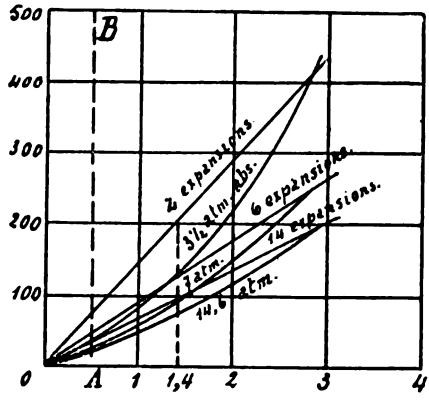


Fig. 11. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h. Machine théorique fournissant un cheval indiqué par 0,703 kgs par cmq de pression moyenne absolue.

Afin de faciliter la compréhension du sujet qui nous occupe, je mettrai à contribution quelques-unes des nombreuses remarques faites par le capitaine Sankey dans une communication faite par lui en 1895 devant l'Institut des Ingénieurs-Mécaniciens de Londres, au sujet de la régu-

Digitized by Google

larisation des machines à vapeur utilisées dans les stations centrales.

Le capitaine Sankey constate que beaucoup d'ingénieurs considèrent l'expansion variable comme le mode de réglage le plus économique, au point de vue de la dépense de vapeur, et qu'ils ne veulent de l'expansion constante que pour les machines de seconde qualité. Cette opinion s'explique, d'après lui, par l'examen superficiel du diagramme d'indicateur fourni dans chacun de ces deux cas.

La machine à expansion variable donnerait des cartes d'indicateur accusant une dépense d'eau inférieure à celle occasionnée par l'emploi d'une valve d'étranglement, seulement, il ne faut pas oublier que le diagramme d'indicateur ne fournit aucun renseignement sur la quantité d'eau réellement présente dans le cylindre ; il permet, tout au plus, de se former une idée approximative du total de fluide évoluant utilement, de sorte que vouloir baser ses préférences sur l'inspection des données d'indicateur seules, serait faire fausse route, cependant, la pratique montre que l'expansion variable est, dans certains cas, plus économique que l'étranglement, mais l'avantage n'est pas général.

Les figures 10 et 11 montrent que l'expansion variable n'est avantageuse qu'entre certaines limites, au-delà desquelles l'étranglement de la vapeur par la valve d'arrivée mérite la préférence. De plus, l'avantage d'un réglage par la variation du degré de détente diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la pression initiale de la vapeur. Les surfaces entre les droites de Willans et les courbes de l'expansion variable diminuent, en effet, quand la pression disponible dans la chapelle de distribution croît. La figure 11, en particulier, montre qu'avec une pression moyenne indiquée de 1,4 kg p/cmq et une pres-

Digitized by Google

sion initiale absolue de 3,5 atmosphères environ, le bénéfice donné par la détente variable atteint 42,5 % ; avec une pression initiale de 7 atmosphères, l'économie descend à 26,3 % et elle se réduit à 18,2 % pour une pression initiale de 14,6 atmosphères absolue.

Ces considérations abstraites ne se réalisent pas complètement en pratique, comme on peut s'en rendre compte par l'inspection des figures 12, 13 et 14 qui se rapportent à des machines Willans.

On a pointillé sur la figure 12 les lois de consommations théoriques, tandis que les traits pleins représentent les dépenses réelles observées. Un simple coup d'œil démontre que l'économie procurée par la détente variable est con-

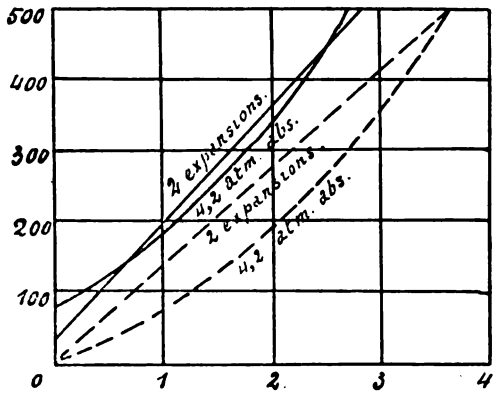


Fig. 12. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h. — Machine simple à condensation. Pression initiale absolue 4,2 atm.

sidérablement moindre en pratique qu'en théorie ; ensuite, on voit qu'aux faibles charges l'étranglement est préférable, de sorte que les bénéfices à retirer de l'emploi d'une expansion variable ne sont pas aussi grands que d'aucuns pensent.

Digitized by Google

La figure 13 fait voir les lois de consommations théoriques et réelles d'une machine utilisant une pression ini-

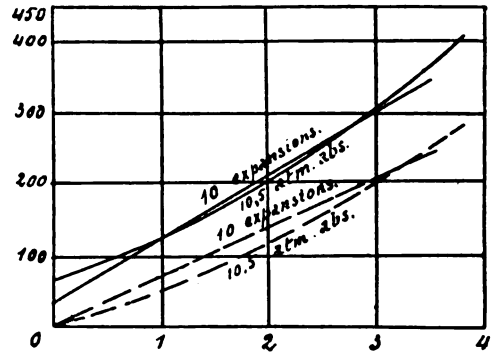


Fig. 13. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h.
Machine compound à condensation. Pression initiale absolue 10,5 atm.

tiale absolue de 10,5 atmosphères et fonctionnant en « régime », c'est à dire d'une façon identique pendant

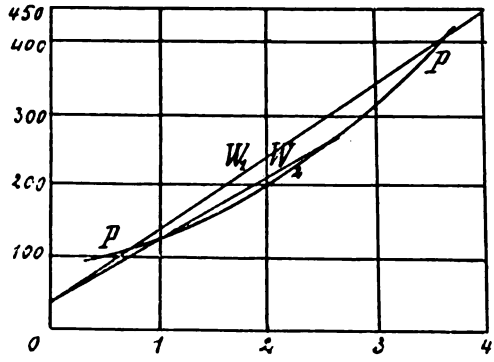


Fig. 14. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h.
Machine compound à condensation. Pression initiale absolue 10,5 atm.

Digitized by Google

tout le cours de l'essai. Si la machine est appelée à travailler sous des charges très variables entre de larges limites, le volume d'admission de vapeur devra être conditionné plus largement si la détente est fixe ; la figure 14 indique, pour ce cas, les lois de consommation W_2 et PP. Il est clair qu'alors la préference de la détente variable ne doit pas se justifier par la considération de l'économie de vapeur seule. Celle-ci n'acquiert de l'importance que si les variations de charge sont peu importantes, ce qui revient à examiner les lignes W_1 et PP.

Notons, en passant, qu'avec la détente variable, la consommation d'eau rapportée au cheval-vapeur indiqué diminue quand la charge augmente jusqu'à ce que le degré de détente le plus économique soit atteint. Au-delà de ce

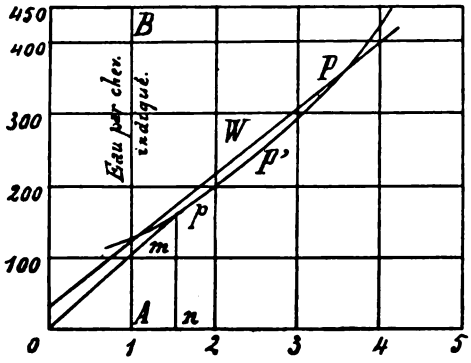


Fig. 15. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq; ord : kgs par h. — Machine compound à condensation. Pression initiale absolue 10,5 atm.

point, l'inverse a lieu, comme on peut s'en convaincre par l'inspection de la figure 15. Le mode de réglage par étranglement, au contraire, donne lieu à un décroissement graduel de la consommation d'eau à mesure que les charges augmentent.

Digitized by Google

Pour démontrer ce point, considérons la figure 15 dans laquelle la droite W se rapporte à l'étranglement, tandis que la courbe PP a trait à la détente variable. Pour obtenir graphiquement la consommation d'eau par cheval-vapeur indiqué en un point *p* pris sur PP, il suffit de mener *op* qui interceptera sur la droite AB « eau par cheval indiqué » une portion A*m* représentant à l'échelle la grandeur cherchée. La droite AB porte des divisions proportionnelles, car les consommations par cheval indiqué sont en raison directe des angles, tels que *p o u*. Il est commode de placer la droite AB de telle manière que la distance *o*A représente, à l'échelle, 1 kg par exemple.

Les développements précédents permettent d'établir graphiquement la comparaison entre les deux modes de régularisation dans une circonstance donnée. En suppo-

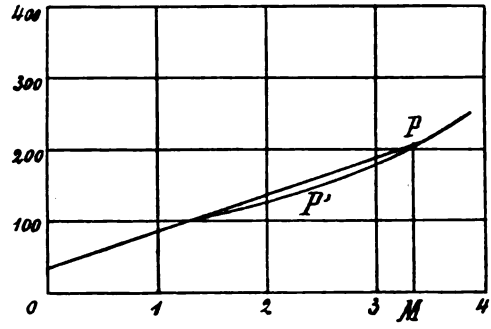


Fig. 16. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h.

sant connue la loi PP' (fig. 16), on mènera pour la pression moyenne *o*M correspondant à la charge maximum et par le point P la droite de Willans W appropriée au cas considéré.

Digitized by Google

Les constructions indiquées suggèrent la solution du problème suivant :

« Quelle est la pression moyenne la plus économique, » étant donnés les conditions de charge, le genre de » machine et la pression initiale disponible dans la cha- » pelle de distribution ? »

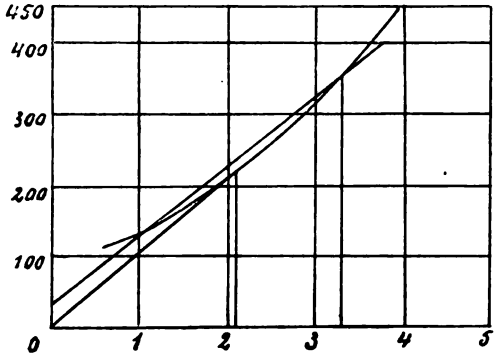


Fig. 17. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h.

L'examen de la figure 17 fait voir que l'expansion variable donne le maximum d'économie aux environs de 2 kgs p/cmq de pression moyenne absolue. En supposant donc que la machine soit appelée à fonctionner normalement sous une charge l, il serait désirable de proportionner les dimensions de son cylindre, de façon qu'avec cette charge, le diagramme d'indicateur accuse une pression moyenne absolue de 2 kgs p/cmq environ. Mais si cette même machine doit être capable de développer une puissance $2l$, la pression moyenne absolue devra être de 4 kgs p/cmq, ce qui n'est plus possible avec les dimensions de cylindre primitivement adoptées. On peut tourner la difficulté en calculant la machine pour une pression

Digitized by Google

moyenne de 3,5 kgs p/cmq et une puissance $2l$. Si elle fonctionne sous une charge l seulement, la pression moyenne ne sera que de 1,75 kg p/cmq et la consommation d'eau ne dépassera que peu celle occasionnée par une pression moyenne de 2 kgs p/cmq.

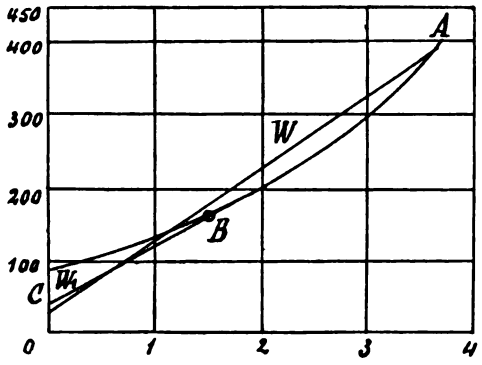


Fig. 18. — Abs : pression moyenne en kgs par cmq ; ord : kgs d'eau par h. — Machine compound à condensation. Pression initiale absolue 10,5 atm.

En règle générale, il est désirable de ne faire fonctionner la machine à expansion variable qu'entre la charge maximum et une charge intermédiaire donnée par le point d'intersection de la courbe d'expansion variable avec la droite de Willans. Au lieu de prendre ce point d'intersection, on peut prendre un point rapproché, tel que B (voir fig. 18).

La machine fonctionnera depuis A jusqu'à B à détente variable et de B en C, elle sera réglée par étranglement suivant W_1 ; la surface comprise entre W et la courbe AB, indique le bénéfice qu'on peut retirer de la détente variable au point de vue de l'économie de vapeur. La fig. 19 est intéressante par la comparaison qu'elle établit entre l'emploi de la condensation et l'échappement à l'air libre.

Digitized by Google

La consommation de vapeur minimum de la machine sans condensation et à détente variable est due à une pression moyenne absolue de 2,7 kgs p/cmq environ, tandis que la condensation abaisse cette pression à 1,8 kg p/cmq.

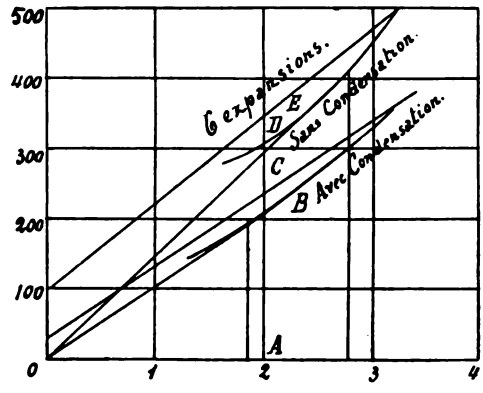


Fig. 19. — Abs : pression moyenne absolue en kgs par cmq ; ord : kgs par h. — Machine compound avec et sans condensation. Pression initiale absolue de 9,2 atm.

Il en résulte donc que la pression la plus économique dans la machine sans condensation s'approche de la pression moyenne maximum possible ; dans la machine à condensation, au contraire, la pression moyenne procurant le maximum d'économie est aux environs de la moitié de la plus grande pression moyenne admissible ; de là, la possibilité de faire fonctionner la machine à condensation entre des limites moins restreintes que celle sans condenseur sans devoir craindre des consommations trop considérables. De plus, la fig. 19 indique que la détente var able est plus avantageuse dans la machine à condensation, l'économie possible étant proportionnellement plus grande : $\frac{DE}{AE} < \frac{BC}{AC}$.

Digitized by Google

Appliquons les principes exposés ci-dessus aux conditions de fonctionnement des stations centrales; pour rendre l'ensemble des conclusions, auxquelles le capitaine Sankey est arrivé, considérons, non seulement les stations de production de force pour traction, mais aussi celles destinées à l'éclairage.

Nous avons déjà vu que les facilités des réparations et de maniement exigent qu'on adopte, dans la station centrale, autant que possible des machines du même type.

Les considérations économiques de dépense de vapeur conduisent à l'installation de machines de force différentes, l'ensemble des unités productrices devant nécessairement être approprié aux diagrammes des charges. Si l'arrangement et le choix des unités ont été faits de manière que les machines peuvent constamment fonctionner aux environs de leurs charges les plus économiques, il est évident qu'on peut régulariser leur marche par le dispositif simple de l'étranglement de la vapeur sans devoir recourir aux complications habituelles de la détente variable qui n'offre, dès lors, plus d'avantages; et cela, surtout si les machines sont sans condensation, car dans ce cas, comme il a été dit plus haut, la charge la plus économique est sensiblement celle nécessitant la pression moyenne maximum disponible. Mais, si les machines sont à condenseur, la pression moyenne la plus économique est environ la demi-pression moyenne maximum, ce qui permet, avons-nous vu, de faire varier les charges plus économiquement que dans le cas précédent sans être obligé d'employer l'expansion constante.

Cette élasticité dans le fonctionnement permet de ne mettre les machines successivement en marche qu'à des intervalles plus longs et de les supprimer plus tôt que si on avait des machines à échappement libre.

Digitized by Google

Passons en revue les différents cas qui peuvent se présenter :

1° Stations centrales à plusieurs unités destinées à la production de force pour l'éclairage.

Considérons les courbes de consommation de courant données par les figures 20 et 21. La première de celles-ci montre la répartition des unités avec des machines à condensation et à expansion constante, tandis que la

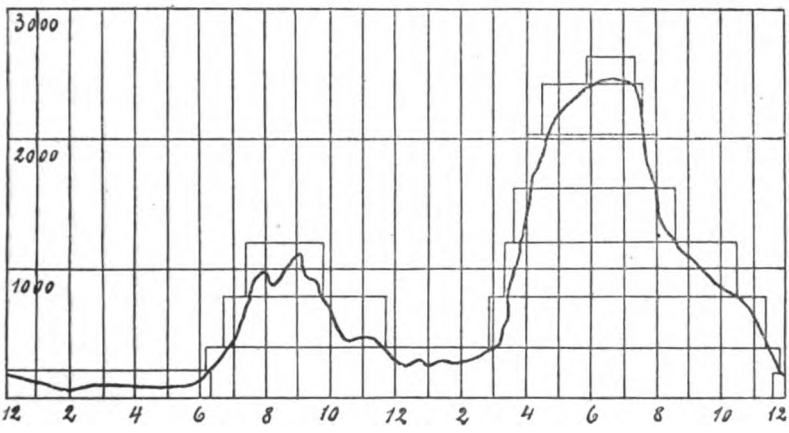


Fig. 20. — Abs : heures ; ord : ampères. — Expansion réglée à une pression moyenne absolue de 2,4 kgs par cmq. — Expansion constante. — Pression initiale absolue 10,5 atm. — Machine à condensation. Chaque unité commence et cesse 10 minutes avant et après son emploi nécessaire.

seconde indique la division avec des machines à condensation et à expansion variable. Avec le premier dispositif, on était obligé de mettre en service 6,5 unités, tandis qu'avec le second, plus élastique, on n'a besoin que de 6 unités.

L'économie dans la consommation totale d'eau atteint, dans ce dernier cas, 12,6 % en faveur de la détente

Digitized by Google

variable. Ceci tend à la conclusion que l'expansion variable, combinée à la condensation, conduit à une réduction du nombre des machines nécessaires dans une station centrale; en d'autres termes, on peut mieux approprier

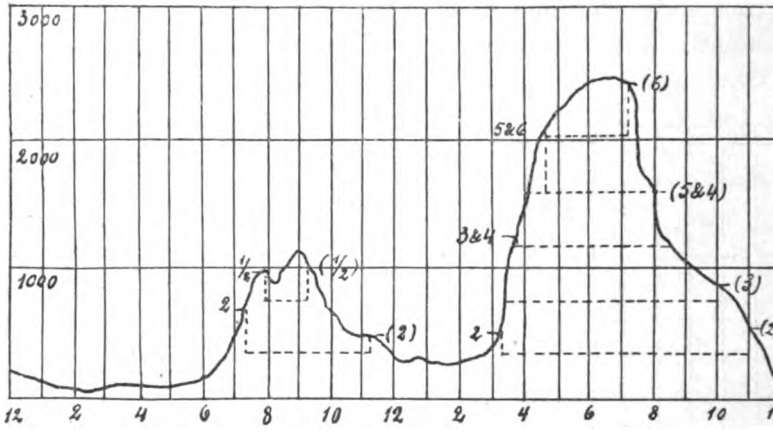


Fig. 21. — Abs : heures ; ord : ampères. — Expansion variable ; le chiffre sans parenthèses indique la mise en service de la machine, les parenthèses marquent la mise hors fonctionnement. Chaque unité commence 5 minutes avant son emploi nécessaire. Pression initiale absolue 10,5 atm.

l'expansion variable à des surcharges momentanées. Si les machines sont appelées à fonctionner sans condensation et si les fluctuations sont fortes, les conclusions peuvent changer.

2° Station centrale à une seule unité pour éclairage :

Dans le cas d'une machine avec condensation, l'expansion variable mérite évidemment la préférence. Si la machine n'a pas de condenseur, le choix du mode de régularisation dépend de la pression initiale disponible et de la durée des fluctuations de charge. Dans le cas où la

Digitized by Google

pression initiale est faible et les variations de consommation de faibles durées, on peut utiliser le mode par étranglement, sinon la détente variable est préférable.

3° Station centrale destinée à un service de traction sans accumulateurs.

Nous avons déjà eu l'occasion de voir que les fluctuations de charge sont considérables et leurs durées très-courtes; nous avons également remarqué que les consommations moyennes de courant varient beaucoup d'un jour à un autre. Ces circonstances conduisent à l'emploi de la détente variable, qui est le mode le plus élastique au point de vue des dépenses économiques de vapeur, surtout si les machines sont pourvues de condenseurs.

D'ailleurs, les chiffres du tableau ci-dessous, extrait d'une communication faite par le capitaine Sankey devant l'Institut des Ingénieurs-Mécaniciens de Londres, mènent à la même conclusion.

On considère succersivement les cas suivants :

Machines à expansion constante.

Machines à expansion variable.

Machines fonctionnant à expansion variable et à expansion constante.

Les augmentations en % de la dépense totale d'eau se rapportent aux consommations relevées avec le dernier dispositif.

Les figures 22, 23 et 24 indiquent les charges pendant le cours des essais. Elles varient, en moyenne de 2 117 chevaux électriques pour la figure 22, à 1 527 chevaux électriques pour la figure 23 et 750 chevaux électriques pour la figure 24. L'inspection du tableau résumant les opérations des essais montrent que l'emploi de la détente variable permet de restreindre la consommation d'eau à des limites très rapprochées du minimum et se prête à une

Digitized by Google

MODE DE RÉGULARISATION.	MAXIMUM DE PUISSANCE DÉVELOPPÉE PAR LES MACHINES DANS CHAQUE CAS : 4,634 CHEV. ÉLECTRIQUES.				MOYENNE : 2,117 CHEV. ÉLECT. (Fig. 22).				MOYENNE : 1,527 CHEV. ÉLECT. (Fig. 23).				MOYENNE : 750 CHEV. ÉLECT. (Fig. 24).				NOMBRE DES UNITÉS EN SERVICE.
	Chevaux indiqués.		Consommation totale d'eau.		Chevaux indiqués.		Consommation totale d'eau.		Chevaux indiqués.		Consommation totale d'eau.		Chevaux indiqués.		Consommation totale d'eau.		
	Maximum I. H. P.	Moyenne I. H. P.	Total en livres.	Augmentation en %.	Maximum I. H. P.	Moyenne I. H. P.	Total en livres.	Augmentation en %.	Maximum I. H. P.	Moyenne I. H. P.	Total en livres.	Augmentation en %.	Maximum I. H. P.	Moyenne I. H. P.	Total en livres.	Augmentoir en %.	
Expansion fixe limitée à une pression moyenne absolue de 35 livres par pouce carré. . .	5 633	3 116	8 740	21,6	5 633	2 526	7 490	27,8	5 633	1 749	5 830	38,2	6				
Expansion fixe limitée à une pression moyenne de 45 lbs.	5 466	2 950	8 590	19,6	5 466	2 359	7 150	22,0	5 466	1 582	5 300	25,8	5				
Expansion fixe limitée à une pression moyenne de 50 lbs.	5 300	2 783	8 250	14,8	5 300	2 193	6 730	14,8	5 300	1 416	4 750	12,7	4				
Expansion variable . .	5 300	2 783	7 220	0,5	5 300	2 193	5 895	0,6	5 300	1 416	4 560	8,2	4				
Expansion fixe et variable.	5 300	2 783	7 185	0,0	5 300	2 193	5 860	0,0	5 300	1 416	4 215	0,0	4				

Digitized by Google

grande élasticité dans les conditions économiques de fonctionnement.

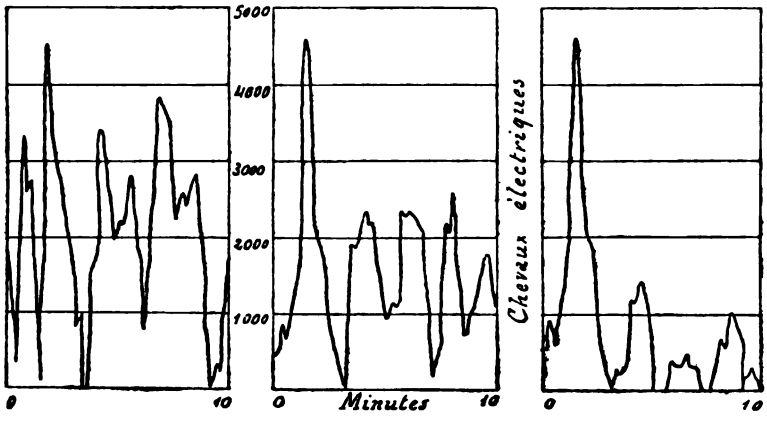


Fig 22. Fig. 23. Fig. 24.

Les figures 25 et 26 montrent deux diagrammes de consommation et la manière dont on effectue la répartition

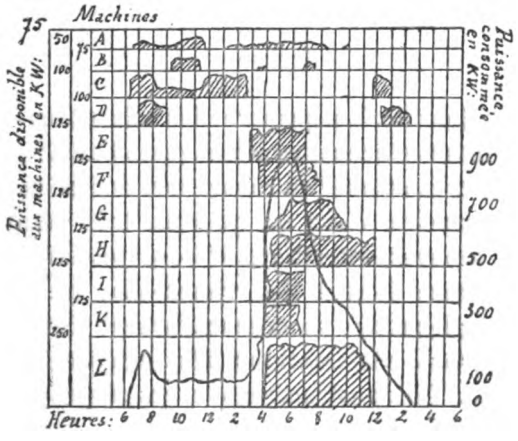


Fig. 25.

Digitized by Google

des charges entre les unités disponibles. On voit aisément que le facteur de puissance, c'est à dire le rapport entre la puissance disponible à l'usine et celle moyenne consommée, est plus faible dans la première figure que dans la seconde, ce qui indique une utilisation moins favorable dans le cas de la figure 26. Il est évident qu'on doit tendre à augmenter le facteur de puissance pour qu'il se rapproche le plus possible de l'unité qui est la limite théorique. Une subdivision raisonnée et bien choisie des charges, ainsi qu'un choix judicieux du genre de machine productrice de force motrice sont des éléments de base

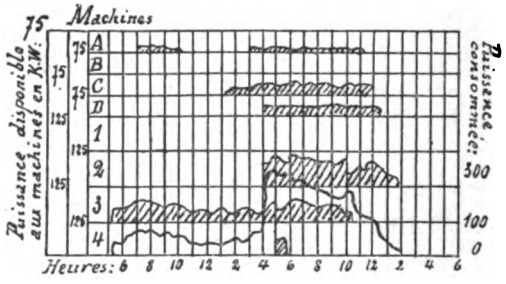


Fig. 26.

dans cette recherche. La question des vibrations communiquées par les machines au voisinage de l'usine centrale, mérite un examen attentif en raison des nombreux ennuis qu'elle peut susciter dans un quartier très peuplé. Les machines à mouvement alternatif sont particulièrement sujettes à donner lieu à des vibrations, qui, tout en paraissant négligeables, se communiquent aux environs et sont la cause de réclamations fréquentes et de tout ce qui en résulte. La construction des machines à mouvement alternatif doit être conçue de façon à éviter le plus possible la dissymétrie dans la répartition des efforts

Digitized by Google

moteurs. Il est à conseiller également de donner à toutes les machines de fortes fondations indépendantes l'une de l'autre et sans communication avec celles du bâtiment d'usine.

En général, on peut estimer que les diverses parties d'une station centrale donnent les rendements ci-dessous.

Dynamos.	80 à 95 %
Accumulateurs.	70 à 80 %
Machine avec transmission . . .	70 à 85 %
Ensemble de l'installation	45 à 50 %

Prix de revient d'exploitation par voiture-kilomètre. — Rapporter les frais d'exploitation au voiture-kilomètre, c'est évidemment se créer une base d'appréciation qui permet de se rendre compte des fluctuations du prix de revient avec les variations dans l'intensité du trafic.

Si l'on a eu soin de décomposer les frais par voiture-kilomètre en leurs parties constitutives principales, on peut facilement suivre, au moyen de constructions graphiques appropriées, les causes des variations des prix kilométriques. Une telle manière de procéder permet de rechercher les conditions d'exploitation les plus économiques pour une ligne donnée; il y a donc une grande utilité à suivre pas à pas les variations des frais par voiture-kilomètre, tant dans leur ensemble que dans leurs parties constituantes les plus importantes. Celles ci sont d'ordres mécanique et commercial : on a, en effet, à considérer le prix de production de l'énergie en se basant sur le trafic et les moyens de créer la puissance requise, ainsi que sur les capitaux engagés dans l'entreprise.

Dans l'étude d'un prix de revient, on devra donc tenir compte des postes suivants, qui sont à rapporter au voiture-kilomètre par des opérations arithmétiques très simples :

Digitized by Google

	Frais par vkm en francs.
1° Frais de main-d'œuvre.	
a. Personnel de conduite à l'usine centrale, tel que l'ingénieur, les mécaniciens, chauffeurs, tourneurs, forgerons, aides, etc. . .	
b. Personnel de conduite sur la ligne : receveurs, conducteurs, contrôleurs, serre-frein, balayeurs, etc.	
2° Frais d'entretien.	
a. Entretien du matériel fixe : machines, chaudières, bâtiments, etc.	
b. Entretien du matériel roulant : voitures, moteurs, trolley, etc.	
c. Entretien de la ligne : voies, connexions électriques, caniveaux	
3° Frais de production de la force motrice.	
a. Combustible et dépenses d'eau	
b. Graissage, éclairage, etc.	
4° Frais d'amortissement du capital engagé	
5° Frais généraux, tels que : assurances, indemnités, accidents, redevances, etc.	
6° Frais de rémunération du capital, comprenant les intérêts.	
Total des frais par vkm.	fr.

L'importance à attribuer aux frais de main-d'œuvre se détermine assez exactement, d'après les conditions locales et les particularités de l'installation. Celle-ci une fois projetée, il n'est pas difficile d'évaluer, à peu de chose près, le personnel nécessaire à son maintien.

En ce qui concerne les frais d'entretien de diverses natures, leur détermination n'est pas aussi aisée ; pour un avant-projet, les chiffres approximatifs suivants, applicables aux conditions d'exploitation européennes, peuvent être de quelque utilité.

Digitized by Google

Frais d'entretien :

Bâtiments, 1 % et 2 % du coût primitif ;
Machines et chaudières, 2 1/2 % du coût primitif ;
Voitures, moteurs, trucs, etc, fr. 0,06 par vkm.
Ligne, fr. 0,015 par vkm.

Quant aux frais de production de l'énergie, il faut, pour les évaluer, partir de la puissance requise et en déduire la puissance nominale de l'usine, en comptant sur un rendement total de 0,45 à 0,50, c'est à dire qu'on admettra que le rapport entre la puissance réelle utilisée et celle indiquée au cylindre de la machine à vapeur, par exemple, flotte entre 0,45 et 0,50.

La puissance nominale étant ainsi connue, la consommation de combustible, d'eau, de gaz ou d'électricité, en découle ; on peut dès lors estimer le coût de production rapporté à une base quelconque, soit le voiture-kilomètre, soit le cheval-électrique utile ou nominal.

Pour une machine à vapeur, on peut compter sur une consommation d'eau de 7 kg par cheval-heure indiqué et sur une évaporation moyenne de 8 1/2 kg d'eau par kg de charbon.

La dépense du gaz riche est d'environ 600 litres par heure et par cheval avec une consommation d'eau de 200 litres pour refroidir le cylindre.

Dans le cas d'un moteur à gaz pauvre, la dépense de gaz varie de 2,5 à 5 mc selon la teneur en hydrogène et composés carburés ; la dépense d'eau destinée au lavage du gaz et au refroidissement du cylindre est approximativement de 100 litres par cheval-heure indiqué.

Aux frais, précédemment cités, il faut ajouter ceux occasionnés par le graissage du matériel ; le total approché atteint fr. 0,01 par voiture kilomètre. Les dépenses d'éclairage et de chauffage des voitures de l'usine s'es-

Digitized by Google

timent facilement, quand on considère le système adopté dans ce but.

Les frais d'amortissement doivent évidemment se répartir sur la durée entière de la concession ; il faut, dans leur détermination, tenir compte des intérêts composés des sommes annuellement mises de coté pour amortir les dépenses d'installation primitives. On conçoit qu'il soit très difficile de fixer l'importance relative des frais généraux cités ci-dessus ; en général, on peut cependant admettre qu'ils atteignent annuellement 5 % du capital engagé.

Il est intéressant de rapprocher des chiffres précédents les degrés de dépréciation de quelques parties d'une installation européenne.

	Dépréciation annuelle.
Bâtiments.	1 à 2 %
Chaudières	9 à 12 %
Dynamos	8 à 10 %
Courroies de transmission . . .	25 à 30 %
Machine à faible vitesse. . . .	5 à 8 %
Machine à grande vitesse . . .	8 à 10 %
Accumulateurs	10 à 15 %

(*A suivre*).

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Chantraine Alphonse, avec Mlle Marie Porta.

* * *

Eclairage par l'Acétylène, G. Pellissier. Carré et Naud, éditeurs. — Nous avons lu avec beaucoup d'intérêt cet ouvrage qui est un exposé complet et bien ordonné de la question de l'éclairage par l'acétylène. M. Pellissier nous rappelle, dans un aperçu historique, les travaux antérieurs aux études des Berthelot et des Moissau sur le carbure de calcium et l'acétylène, puis la part des nombreux inventeurs qui se sont essayés à la solution du problème industriel qu'elles avaient posé. Il nous donne ensuite les propriétés du carbure et de l'acétylène, la description des fours électriques employés à la fabrication du carbure et des appareils de génération de l'acétylène. L'auteur divise ces derniers en trois grandes classes, les appareils où l'eau tombe en quantité déterminée sur le carbure, ceux où l'eau arrive au contact du carbure par suite d'une dénivellation produite dans des vases communiquants, enfin, ceux où le carbure est jeté dans l'eau par petites portions.

Les inconvénients et les avantages de chacun de ces engins sont judicieusement examinés, de même que ceux des lampes portatives, dont la description détaillée vient ensuite.

L'acétylène se liquéfiant aisément, on songe à le distribuer sous forte pression, liquéfié ou simplement com-

Digitized by Google

primé, dans des bonbonnes portatives. L'auteur apprécie l'avenir de ces systèmes et développe avec impartialité la question de la sécurité, naguère de triste actualité.

Sur ce dernier point, il donne l'avantage au système intéressant de MM. Claude et Hess, lesquels arrivent à une excellente utilisation des bonbonnes en dissolvant, sous pression relativement faible, l'acétylène dans l'acétone.

L'étude complète de la flamme du gaz et des brûleurs qu'il réclame reçoit le développement qu'elle comporte, et le livre se termine par la comparaison des différents systèmes d'éclairage, des prix de revient de chacun d'eux. Vient, enfin, une suite de règles pratiques pour l'installation des appareils

L'ouvrage est illustré, dans le texte, de figures très claires; il se recommande de tous points à ceux qui s'intéressent à cette question... d'actualité.

Digitized by Google

SÉANCE DU 24 OCTOBRE 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

Ont signé la liste de présence : MM. André, Andrews, Berlow, Bodden, Briffaux, Cassa, Colard, Compijn, De Bast, Debavelaere, Decroës, de Metz, de Muyser, Exelbirth, Roussakoff, Kroll, L'Hoest, Maus, Robert L., Sweginski, Tcherniak, Van Asperen, Van der Wallen, Van Dooren, Van Musschenbroek, Viscidi, Weker.

M. L'Hoest, *secrétaire général*, dépose les ouvrages offerts :

Traité d'électricité pratique, par M. R. BOULVIN ;

Il fenomeno di Hall nei liquidi, par M. le Docteur Flaminio CHIAVASSA ;

Se i raggi X esistano gia nel fascio catodico che li produce, par M. Antonio RÒITI ;

Système de traction électrique par contacts électromagnétiques, par M. R. DEMEUSE.

Remercîments.

M. De Bast, *président*, après avoir constaté que les procès-verbaux des séances des 28 mars, 30 mai, 27 juin et 1er août, publiés dans les deux derniers fascicules du

Digitized by Google

Bulletin, ne donnent lieu à aucune observation, les déclare approuvés

Il donne la parole à **M. Colard** pour lecture de sa communication sur

Les constantes de réaction et l'équation caractéristique d'un réseau électrique. Méthode d'étude de l'état électrique variable.

Dans un réseau électrique qui comprend résistances, coefficients de self-induction et d'induction mutuelle, et capacités, et qui est le siége de forces électromotrices, *fonctions du temps seul*, les potentiels aux nœuds et les intensités de courant dans les branches sont données, en fonction du temps, par des équations différentielles linéaires simultanées, dont les seconds membres, fonctions du temps, sont les forces électromotrices appliquées aux diverses branches. Le système *intégrale générale* de ces équations est la superposition de deux systèmes : le premier est le système *intégrale générale* des équations supposées dépourvues de seconds membres ; le second est un système *intégrale particulière* des équations munies de leurs seconds membres.

Cette propriété analytique n'est que la traduction d'un fait physique, qu'on peut énoncer comme suit :

L'état électrique du réseau avec forces électromotrices appliquées, fonctions du temps seul, est la superposition de deux états : le premier est l'état général dans l'hypothèse où aucune force électromotrice n'est appliquée au réseau ; le second est un des états particuliers, dans lequel peut se trouver le réseau sous l'action des forces électromotrices appliquées. On peut

Digitized by Google

choisir pour cet état particulier, l'état de régime, pour autant que les forces électromotrices soient telles que cet état de régime existe.

On peut donc encore dire, dans ce cas, que *l'état électrique variable résulte de la superposition de l'état de régime dû aux forces électromotrices appliquées, et de la réaction propre du réseau, réaction dont les caractères généraux sont indépendants de ces forces électromotrices appliquées.*

La forme générale de cette réaction une fois déterminée pour un réseau donné, on pourra s'en servir ensuite, très simplement, pour déterminer l'état variable dans l'hypothèse particulière d'un système donné de forces électromotrices fonctions de temps.

Nous allons démontrer qu'il ne reste indéterminé, dans l'expression générale de la réaction du réseau, que des coefficients constants; leur nombre sera égal à celui des conditions aux limites, nécessaires et suffisantes pour que le problème soit complètement déterminé. On pourra donc calculer ces coefficients dès que l'on se sera fixé ces conditions aux limites.

La question de la détermination de l'état variable est ainsi ramenée à deux questions distinctes, et est rendue incontestablement plus aisée : 1° la détermination de la réaction *générale* propre du réseau; 2° la détermination de l'état de régime *particulier* à la distribution *particulière* de forces électromotrices que l'on considère.

La première partie du problème reste la même pour le même réseau, quel que soit le système de forces électromotrices que l'on y appliquera ensuite, à part les quelques coefficients dont je viens de parler. La méthode qui va être exposée sera donc particulièrement avantageuse quand on se trouvera devoir étudier, pour le même réseau, l'état variable qui serait dû à l'un ou l'autre système distinct de forces électromotrices appliquées.

Digitized by Google

En outre, *la réaction électrique générale d'un réseau est une propriété caractéristiqne de ce réseau,* indépendamment des forces électromotrices que l'on y applique. Il sera sans doute souvent intéressant de pouvoir comparer les propriétés caractéristiques types de divers types de réseaux.

Comme on le verra d'ailleurs, la partie analytique du problème se réduira à la résolution d'une seule équation algébrique à une inconnue, de degré plus ou moins élevé; à des dérivations et à des calculs algébriques simples. Les calculs se prêtent particulièrement à l'emploi des déterminants, ce qui permet de les exécuter de façon méthodique, rapide et élégante.

Ce mode d'étude de l'état variable pourra, je pense, être particulièrement utile quand on aura à considérer des systèmes télégraphiques et téléphoniques compliqués (système Van Rysselberghe et analogues, télégraphie multiple, etc.), dans lesquels, comme on le sait, seule la période variable des courants a de l'importance, et pour la plupart desquels, jusqu'à présent, on manque d'indications précises.

La méthode que je vais donner n'a pas encore été, que je sache, exposée d'une façon générale. MM. Vaschy et Brilynski, notamment, ont employé, pour leurs belles recherches sur les phénomènes télégraphiques et téléphoniques, les mêmes méthodes d'élimination ; mais ils n'ont traité que des cas particuliers. Ce qui, je crois, caractérise mon mode de résolution, est la mise en évidence de la réaction propre du réseau, abstraction faite des forces électromotrices qu'on y appliquera dans la suite, et la division du problème général en deux problèmes plus simples.

Digitized by Google

CHAPITRE I.

LA RÉACTION DU RÉSEAU. — CAS OU IL N'Y A PAS DE FORCES ÉLECTROMOTRICES APPLIQUÉES.

1. — *Le réseau.*

Considérons un réseau électrique complètement indépendant du reste de l'espace, comprenant β branches distinctes et ν nœuds. Nous ne supposerons aucune relation particulière entre les nombres β et ν.

Soient, à un instant quelconque t, v_1 v_2 .... $v_{\nu-1}$ les excès des potentiels électriques des $(\nu-1)$ premiers nœuds sur le potentiel du ν^e nœud. Comme les valeurs absolues des potentiels n'ont aucun intérêt dans la question qui nous occupe, nous pourrons, sans inconvénient, considérer les quantités v_1 v_2 .... $v_{\nu-1}$ comme les potentiels des $(\nu-1)$ premiers nœuds, le ν^e nœud étant supposé au potentiel zéro. Les potentiels v sont fonctions du temps.

Soient encore, au même instant quelconque t, i_1 i_2 .... i_β les intensités des courants électriques, en grandeur et en signe, dans chacune des β branches du réseau : le sens considéré comme positif sera choisi arbitrairement dans chaque branche. Dans les applications particulières, il sera bon, pour la symétrie des calculs, d'adopter une règle pour le choix de ce sens positif; on pourrait, par exemple, prendre comme positif le sens de la marche du nœud de numéro moins élevé vers le nœud de numéro plus élevé Les intensités de courant i sont aussi fonctions du temps.

Nous avons donc à calculer β fonctions i; et $(\nu - 1)$ fonctions v, soit en tout $(\beta + \nu - 1)$ fonctions. Pour cela, outre les conditions aux limites, $(\beta + \nu - 1)$ équations nous seront nécessaires.

Digitized by Google

2. — *Equations des branches.*

Supposons que chacune des branches, la branche numérotée h, par exemple, comprenne :

1° Une résistance ohmique r_h.

2° Des condensateurs en série de capacité c_h, dont la somme des inverses soit $P_h = \Sigma \frac{1}{c_h}$. Dans le cas où aucun condensateur n'est embroché dans cette branche, il faudra faire $P_h = 0$; ce cas revient en effet au cas où la branche comprendrait un condensateur dont les armatures seraient en contact et dont, par conséquent, la capacité serait infinie.

3° Enfin, représentons par $m_{1h}\ m_{2h} \ldots m_{hh} \ldots m_{nh}$ les coefficients d'induction mutuelle de cette branche h par rapport aux différentes branches du réseau, affectés de signes tels qu'un accroissement positif de courant dans l'une quelconque de ces branches produise dans la branche h une force électromotrice d'induction négative. On voit de suite que, dans le symbole m_{pq}, on peut intervertir l'ordre des indices sans changer la valeur du symbole, c'est-à-dire que $m_{pq} = m_{qp}$. Quant au symbole m_{hh} à indices égaux, il représente le coefficient de self-induction de la branche h.

Nous supposerons les quantités P, m et r constantes, indépendantes du temps.

Comme on le remarque, nous admettrons, pour le moment, qu'*aucune force électromotrice appliquée n'agit dans le réseau*.

La branche h réunit, par exemple, dans le sens positif, les nœuds numérotés k et l.

Soit q_o la charge initiale du condensateur de capacité c quelconque, à l'instant $t = 0$.

Digitized by Google

On aura la relation :

$$v_i - v_k + r_h i_h + P_h \int_0^t i_h \, dt - \sum_h \frac{q_0}{C} + \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} \frac{di_s}{dt} = 0$$

Dérivons-la par rapport au temps, et représentons par les quantités affectées des indices (') (") (''') . . . leurs dérivées par rapport au temps. Nous obtenons

$$v'_i - v'_k + r_h i'_h + P_h i_i + \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} i''_s = 0 \qquad (1)$$

équation qui est indépendante des charges initiales des condensateurs.

Chacune des β branches nous fournira une équation analogue à l'équation (1). Nous aurons aussi β premières relations entre les fonctions i et v et le temps.

3. — *Équations aux nœuds.*

En appliquant à chacun des nœuds la loi de continuité du courant, nous obtiendrons ν équations par rapport aux β fonctions i, savoir :

$$\sum_1 \pm i = 0 \quad \sum_2 \pm i = 0 \quad \ldots \quad \sum_{\nu-1} \pm i = 0 \quad \sum_{\nu} \pm i = 0 \qquad (2)$$

les i étant pris avec le signe + quand le courant est dirigé vers le nœud et avec le signe — quand il s'en écarte.

Mais si la condition de continuité du courant est satisfaite en $(\nu - 1)$ des nœuds, elle le sera nécessairement au ν^e nœud, puisque le réseau est indépendant de l'espace extérieur, d'où il ne reçoit et où il n'émet par conséquent

Digitized by Google

aucune quantité d'électricité. Il en résulte que des ν équations (2), l'une n'est que la conséquence des $(\nu-1)$ autres.

Il n'y a donc, au plus, que $(\nu - 1)$ de ces équations qui soient distinctes. Pour la symétrie des calculs, nous écarterons celle de ces ν équations qui se rapporte au nœud dont le potentiel est choisi comme zéro des potentiels; soit, d'après ce qui précède, la ν^e équation.

4. — *Système d'équations du réseau.*

Nous avons ainsi, pour déterminer les $(\beta + \nu - 1)$ fonctions inconnues i et v, d'abord les β équations de la forme (1) ; puis les $(\nu-1)$ équations de la forme (2); soit en tout $(\beta + \nu - 1)$ équations.

Comme, abstraction faite des conditions aux limites, le problème de la distribution électrique dans le réseau est physiquement déterminé ; et comme, d'autre part, nous ne pouvons poser d'autres équations que celles que nous avons posées, il faut nécessairement que ces $(\beta + \nu - 1)$ équations suffisent pour déterminer les $(\beta + \nu - 1)$ fonctions inconnues ; ces équations seront donc distinctes.

5. — *Forme des fonctions i et v. Les équations aux coefficients exponentiels.*

Le système d'équations (1) (2) étant, par rapport aux i et aux v fonctions de t, un système d'équations différentielles linéaires simultanées sans seconds membres, les fonctions i et v seront des sommes de fonctions exponentielles du temps.

Digitized by Google

Substituons aux $(\beta + \nu - 1)$ variables i et v des expressions exponentielles :

$$i_1 = X_1 e^{xt} \qquad i_2 = X_2 e^{xt} \ldots \qquad i_\beta = X_\beta e^{xt}$$

$$v_1 = X_{\beta+1} e^{xt} \quad v_2 = X_{\beta+2} e^{xt} \ldots v_{\nu-1} = X_{\beta+\nu-1} e^{xt},$$

dans lesquelles nous supposerons les quantités X et x constantes.

L'exponentielle e^{xt} sera facteur commun dans toutes les équations et pourra être supprimée.

Les β équations (1) prennent alors la forme

$$x^2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_s + x \left(X_{\beta+l} - X_{\beta+k} + r_h X_h \right) + P_h X_h = 0 \qquad (3)$$

et les $(\nu - 1)$ équations (2) deviendront analogues à

$$\Sigma X = 0. \qquad (4)$$

6. — *Équation caractéristique du réseau.*

Le système des $(\beta + \nu - 1)$ équations (3) (4) est algébrique, linéaire et homogène par rapport aux $(\beta + \nu - 1)$ coefficients exponentiels X.

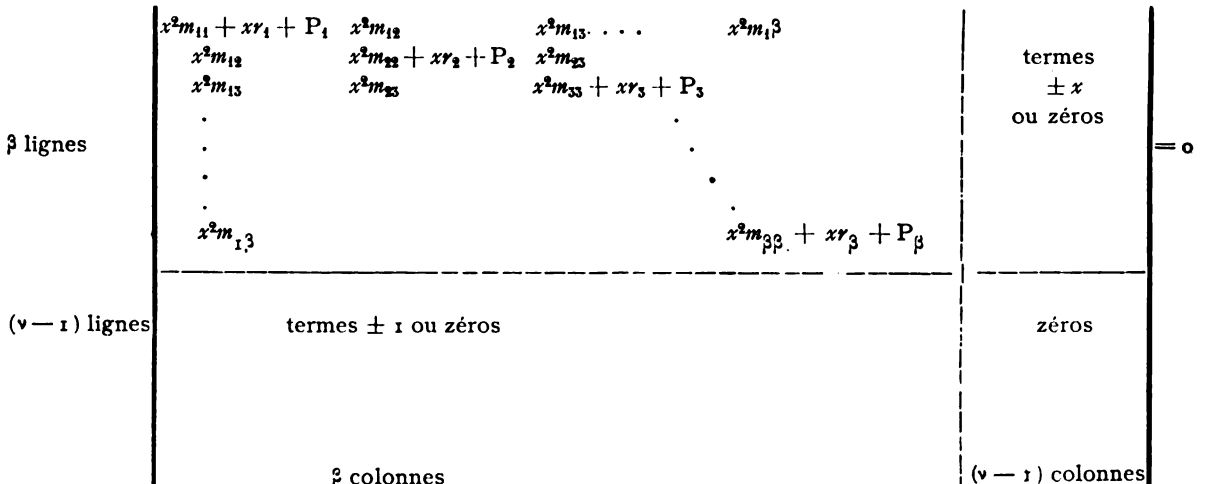
En éliminant entre ces équations les quantités X, nous obtiendrons une certaine équation algébrique en x, que j'appellerai l'équation caractéristique du réseau.

Si nous considérons le déterminant Δ éliminant du système (3) (4), l'équation en x ne sera autre que cette éliminant égalé à zéro

$$\Delta = 0. \qquad (5)$$

Cette équation est de la forme (5*bis*),

Digitized by Google



Digitized by Google

Abstraction faite des racines $x = o$, dont, ainsi que nous le verrons plus loin, nous n'avons pas à tenir compte, on peut remplacer les termes $\pm x$ de la portion droite supérieur du déterminant par des termes ± 1, et dès lors, le déterminant devient symétrique par rapport à la diagonale des termes trinomes, si l'on a eu soin de ranger les équations relatives aux nœuds dans leur ordre naturel 1, 2, 3. . . . et les termes en X des équations (3) et (4) dans leur ordre naturel $X_1\ X_2\ X_3\ \ldots$

En effet :

1° Les parties inférieures de droite et supérieures de gauche du déterminant sont symétriques puisque $m_{pq} = m_{qp}$.

2° En ce qui concerne les deux autres parties :

Supposons que le terme commun à la s^e ligne et à la $(\beta + r)^e$ colonne soit nul ; cela proviendra de ce que le potentiel du r^e nœud n'intervient pas dans l'équation de la s^e branche ; c'est donc que cette branche n'aboutit pas à ce nœud ; il en résulte que le courant, dans cette branche, n'intervient pas dans l'équation à ce nœud, c'est-à-dire que le terme du déterminant commun à la s^e colonne et à la $(\beta + r)^e$ ligne sera nul.

Supposons ensuite que le terme commun à la s^e ligne et à la $(\beta + r)^e$ colonne, soit ± 1 ; cela proviendra de ce que le potentiel du r^e nœud intervient, avec le signe $\pm$, dans l'équation de la s^e branche ; c'est donc que cette branche aboutit à ce nœud et y apporte ou en emporte du courant ; le courant de cette branche intervient donc avec le signe ± 1 dans l'équation à ce nœud, c'est-à-dire que le terme du déterminant commun à la s^e colonne et à la $(\beta + r)^e$ ligne sera ± 1.

Digitized by Google

Le déterminant sera donc symétrique.

7. — Le degré du réseau. Les constantes de réaction du réseau.

Supposons que l'équation caractéristique (5) soit de degré d. J'appellerai d le *degré du réseau*. L'équation a d racines

$$x_1\ x_2\ x_3 \ldots . x_d.$$

De la nature des racines et selon qu'elles seront réelles ou imaginaires, dépendra la nature non oscillatoire ou oscillatoire des potentiels aux nœuds et des courants dans les branches du réseau.

D'ailleurs, les coefficients de x dans l'équation (5) ne dépendent que des constantes P $m\ r$ du réseau

Les racines x ne dépendront donc non plus que des constantes P $m\ r$ *du réseau*. Elles seront absolument indépendantes des conditions aux limites et des forces électromotrices que l'on appliquera dans la suite au réseau. On pourrait appeler ces racines les *constantes de réaction du réseau*.

8. — Cas des racines x distinctes. Valeurs des x.

Deux cas peuvent se présenter : ou bien les d racines $x_1\ x_2 \ldots x_d$ de l'équation caractéristique sont distinctes ; ou bien certaines de ces racines sont des racines multiples.

Nous supposerons d'abord que les racines sont distinctes.

Le système d'équations algébriques en X, (3) (4), étant

Digitized by Google

homogène par rapport aux quantités X, nous ne pourrons déterminer complètement ces quantités X, mais seulement les rapports qu'elles ont entre elles; ce qui revient à les déterminer à une constante K près.

En désignant par $\delta_1\ \delta_2\ \delta_3 \ldots \delta_{(\beta+\nu-1)}$ les déterminants mineurs du déterminant Δ, pris par rapport aux termes successifs de sa première ligne, nous aurons (6)

$$X_1 = K\delta_1 \quad X_2 = K\delta_2 \quad X_3 = K\delta_3 \ldots \quad X_{\beta+\nu-1} = K\delta_{\beta+\nu-1}$$

Les mineurs δ sont des fonctions algébriques de x, dont les coefficients ne dépendent que des constantes P mr du réseau.

Les équations (6) ne sont valables que pour autant que x affecte une des valeurs $x_1\ x_2 \ldots . x_d$. D'ailleurs, la constante K n'est la même que pour un même système des X relatifs à une même valeur de x. La racine x ayant d valeurs, nous aurons d systèmes de valeurs de $X_1\ X_2 \ldots$ ayant chacun sa constante K particulière.

En désignant par δ_{ju} le mineur de Δ relatif au j^e terme de la première ligne, et dans lequel on a remplacé x par x_u, nous aurons d système de valeurs des X qui seront

$$\begin{array}{llll}
K_1\delta_{11} & K_1\delta_{21} & K_1\delta_{31} \ldots . & K_1\delta_{(\beta+\nu-1)1} \\
K_2\delta_{12} & K_2\delta_{22} & K_2\delta_{32} \ldots . & K_2\delta_{(\beta+\nu-1)2} \\
\ldots . & & & \\
K_d\delta_{1d} & K_d\delta_{2d} & K_d\delta_{3d} \ldots . & K_d\delta_{(\beta+\nu-1)d}.
\end{array} \qquad (7)$$

Digitized by Google

9. — *Expression des fonctions i et v. Les conditions aux limites.*

Les fonctions i et v affectent donc la forme (8)

$$i_1 = K_1 \delta_{11} e^{x_1 t} + K_2 \delta_{12} e^{x_2 t} + \ldots + K_d \delta_{1d} e^{x_d t}$$
$$i_2 = K_1 \delta_{21} e^{x_1 t} + K_2 \delta_{22} e^{x_2 t} + \ldots + K_d \delta_{2d} e^{x_d t}$$
$$\vdots$$
$$v_1 = K_1 \delta_{(\beta+1)1} e^{x_1 t} + K_2 \delta_{(\beta+1)2} e^{x_2 t} + \ldots + K_d \delta_{(\beta+1)d} e^{x_d t}$$
$$v_2 = K_1 \delta_{(\beta+2)1} e^{x_1 t} + K_2 \delta_{(\beta+2)2} e^{x_2 t} + \ldots + K_d \delta_{(\beta+2)d} e^{x_d t}$$
$$\ldots$$
$$v_\nu = 0.$$

Il ne reste indéterminé dans ces expressions que les d constantes K_1 $K_2 \ldots K_d$. Pour les déterminer, il faudra recourir aux conditions aux limites. Pour obtenir d équations en K distinctes, aux limites, nous devrons nous donner d conditions aux limites, physiquement distinctes. Ces conditions nécessaires seront d'ailleurs suffisantes pour déterminer complètement la distribution électrique dans le réseau.

Ainsi, le nombre d ou *le degré du réseau est égal au nombre de conditions aux limites, nècessaires et suffisantes pour que la distribution électrique soit physiquement déterminée.*

Si ces conditions aux limites sont linéaires par rapport aux courants et aux potentiels, les équations qui les expriment seront linéaires par rapport aux constantes K, dont le calcul ne présentera, dès lors, aucune difficulté.

REMARQUE. — *Nous avons négligé les racines x nulles.* En effet, les termes en e^{ot} seront constants, indépen-

Digitized by Google

dants du temps ; leurs coefficients KX doivent donc être nuls dans les expressions (8), puisque, aucune force électromotrice n'étant appliquée au réseau, il est impossible que, quel que soit le système de conditions initiales rendant nuls les K relatifs aux autres racines x, il existe dans le réseau une distribution électrique permanente autre que l'équilibre, c'est à dire qu'il faut alors que $i_1 = i_2 = \ldots = v_1 = v_2 = \ldots =$ zéro.

10. — Cas des racines x multiples. — Équations en X.

Supposons que la racine x_1 ait un degré de multiplicité égal à n. Alors le système différentiel (1) et (2) admet les solutions (9)

$$i_1 = [X_{10} + X_{11}\,t + X_{12}\,t^2 + \ldots + X_{1(n-1)}\,t^{n-1}]\,e^{xt}$$
$$i_2 = [X_{20} + X_{21}\,t + X_{22}\,t^2 + \ldots + X_{2(n-1)}\,t^{n-1}]\,e^{xt}$$
$$\ldots\ldots$$
$$v_1 = [X_{\beta+1)0} + X_{\beta+1)1}\,t + X_{\beta+1)2}\,t^2 + \ldots + X_{\beta+1)(n-1)}\,t^{n-1}]\,e^{xt}$$
$$v_2 = [X_{\beta+2)0} + X_{\beta+2)1}\,t + X_{\beta+2)2}\,t^2 + \ldots + X_{\beta+2)(n-1)}\,t^{n-1}]\,e^{xt}$$

les n $(\beta + \nu - 1)$ quantités X étant des constantes.

Substituons d'abord ces valeurs dans les $(\nu - 1)$ équations (2) ; nous obtenons les $(\nu - 1)$ équations de la forme (10)

$$\Sigma \pm X_{,0} + t\,\Sigma \pm X_{,1} + t^2\,\Sigma \pm X_{,2} + \ldots + t^{n-1}\,\Sigma \pm X_{,(n-1)} = 0$$

les premiers indices des X étant successivement les numéros d'ordre des branches qui aboutissent aux nœuds considérés.

Ces relations doivent être vérifiées, quel que soit t. Elles conduisent donc à $(\nu - 1)$ systèmes de la forme (11)

$$\Sigma \pm X_{,0} = 0 \quad \Sigma \pm X_{,1} = 0 \quad \Sigma \pm X_{,2} = 0 \ldots \Sigma \pm X_{,(n-1)} = 0$$

Digitized by Google

chaque système analogue étant relatif à un nœud différent : soit donc $n(\nu - 1)$ équations.

Faisons aussi les substitutions (9) dans les β équations (1). Nous obtiendrons β équations algébriques et du $(n-1)^e$ degré en t, qui devront être vérifiées, quel que soit t. Les divers coefficients de t devront donc s'annuler, ce qui conduit à β systèmes de la forme suivante, comprenant chacun n équations (12).

$$\left.\begin{aligned} &x^2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{so} + x\left(X_{(\beta+l)0} - X_{(\beta+k)0} + r_h X_{ho}\right) + P_h X_{ho} \\ &+ 2x \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s1} + \left(X_{(\beta+l)1} - X_{\beta+k)1} + r_h X_{h1}\right) \\ &+ 2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s2} \end{aligned}\right\} = 0$$

$$\left.\begin{aligned} &x^2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s1} + x\left(X_{(\beta+l)1} - X_{\beta+k)1} + r_h X_{h1}\right) + P_h X_{h1} \\ &+ 2\left[2x \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s2} + \left(X_{\beta+l)2} - X_{\beta+k)2} + r_h X_{h2}\right)\right] \\ &+ 3 \times 2 \sum_{s=1}^{s=2} m_{hs} X_{s3} \end{aligned}\right\} = 0$$

. . . . . .

$$\left.\begin{aligned} &x^2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{sp} + x\left(X_{(\beta+l)p} - X_{(\beta+k)p} + r_h X_{hp}\right) + P_h X_{hp} \\ &+ (p+1)\left[2x \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s(p+1)} + \left(X_{(\beta+l)(p+1)} - X_{(\beta+k)(p+1)} + r_h X_{h(p+1)}\right)\right] \\ &+ (p+2)(p+1) \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s(p+2)} \end{aligned}\right\} = 0$$

Digitized by Google

. . . . . .

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s(n-2)} + x\left(X_{(\beta+l)(n-2)} - X_{(\beta+k)(n-2)} + r_h X_{h(n-2)}\right) + P_h X_{h(n-2)} \\ &(n-1)\left[2x \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s(n-1)} + \left(X_{(\beta+l)(n-1)} - X_{(\beta+k)(n-1)} + r_h X_{h(n-1)}\right)\right. \end{aligned}\right\} = 0$$

$$\sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} X_{s(n-1)} + x\left(X_{(\beta+l)(n-1)} - X_{(\beta+k)(n-1)} + r_h X_{h(n-1)}\right) + P_h X_{h(n-1)} = 0$$

h, selon que l'on considérera les diverses branches, prendra dans les β systèmes analogues, les valeurs 1, 2, 3... β. Nous avons donc $n\beta$ équations de la forme (12).

Ainsi, pour déterminer les $n(\beta + \nu - 1)$ quantités X, nous avons $n(\nu - 1)$ équations (11) et $n\beta$ équations (12), soit en tout $n(\beta + \nu - 1)$ équations.

11. — *Notations abrégées. — Quelques propriétés du déterminant* Δ.

Les notations jusqu'ici admises étaient nécessaires pour montrer la composition des divers termes des équations. Mais elles peuvent, pour les calculs qui vont suivre, être considérablement simplifiées.

Revenons au déterminant Δ tel qu'il est écrit en (5bis). Nous pouvons l'exprimer par

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \cdots\cdots a_{1(\beta+\nu-1)} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \cdots\cdots a_{2(\beta+\nu-1)} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \cdots\cdots a_{3(\beta+\nu-1)} \\ \vdots & & \\ a_{(\beta+\nu-1)1} & a_{(\beta+\nu-1)2} & a_{(\beta+\nu-1)3} \cdots\cdots a_{(\beta+\nu-1)(\beta+\nu-1)} \end{vmatrix} \quad (13)$$

Digitized by Google

les quantités a étant des fonctions de x de degré 2 au maximum, dont les coefficients ne dépendent que des constantes P mr du réseau.

Le déterminant (13) est nul pour $x = x_j$. En outre, x_q étant une racine n tuple de l'équation (5), sera racine des $(n-1)$ premières dérivées du déterminant, prises par rapport à x.

Le déterminant Δ est d'ailleurs égal à

$$a_{11}\,\delta_1 + a_{12}\,\delta_2 + a_{13}\,\delta_3 + \ldots.$$

En dérivant cette expression, nous remarquerons que les quantités a étant au plus du second degré par rapport à x, leurs dérivées au-delà de la dérivée seconde seront nulles.

Nous aurons, en notations symboliques,

$$\begin{aligned}
\Delta &= \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1} \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dx}\right)^0 (a_{1j}, \delta_j) = 0 \\
\Delta^1 &= \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1} \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dx}\right)^1 (a_{1j}, \delta_j) = 0 \qquad (14) \\
\ldots\ldots\ \Delta^{(n-1)} &= \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1} \left(\frac{d}{dx} + \frac{d}{dx}\right)^{n-1} (a_{1j}, \delta_j) = 0.
\end{aligned}$$

En outre, le déterminant Δ étant identiquement nul, ainsi que toutes ses dérivées, quel que soit x, quand on substitue à sa première ligne successivement sa seconde, sa troisième ... ligne, nous aurons de même, les δ restant les mêmes mineurs de déterminant Δ par rapport aux termes de sa première ligne :

Digitized by Google

$$\sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{0}(a_{2j},\delta_j)=0 \qquad \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{0}(a_{3j},\delta_j)=0 \quad \ldots.$$

$$\sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{1}(a_{2j},\delta_j)=0 \qquad \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{1}(a_{3j},\delta_j)=0 \quad \ldots. \quad (15)$$

$$\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots$$

$$\sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{n-1}(a_{2j},\delta_j)=0 \qquad \sum_{j=1}^{j=\beta+\nu-1}\left(\frac{d}{dx}+\frac{d}{dx}\right)^{n-1}(a_{3j},\delta_j)=0 \quad \ldots.$$

On déduit des relations (14) et (15), en remarquant que

$$a''' = a'''' = \ldots = 0$$

puisque a est au plus du 2e degré en x

$$\begin{aligned}
&a_{11}\delta_1 + a_{12}\delta_2 + a_{13}\delta_3 + \ldots = 0\\
&a_{21}\delta_1 + a_{22}\delta_2 + a_{23}\delta_3 + \ldots = 0\\
&a_{31}\delta_1 + a_{32}\delta_2 + a_{33}\delta_3 + \ldots = 0\\
&\ldots\ldots\\
&a_{11}\delta'_1 + a_{12}\delta'_2 + a_{13}\delta'_3 + \ldots = -(a'_{11}\delta_1 + a'_{12}\delta_2 + \ldots.)\\
&a_{21}\delta'_1 + a_{22}\delta'_2 + a_{23}\delta'_3 + \ldots = -(a'_{21}\delta_1 + a'_{22}\delta_2 + \ldots.)\\
&a_{31}\delta'_1 + a_{32}\delta'_2 + a_{33}\delta'_3 + \ldots = -(a'_{31}\delta_1 + a'_{32}\delta_2 + \ldots.)\\
&\ldots\ldots \qquad (16)
\end{aligned}$$

$$a_{11}\delta''_1 + a_{12}\delta''_2 + a_{13}\delta''_3 + \ldots = -2(a'_{11}\delta'_1 + a'_{12}\delta'_2 + \ldots) - (a''_{11}\delta_1 + a''_{12}\delta_2 + \ldots)$$
$$a_{21}\delta''_2 + a_{22}\delta''_2 + a_{23}\delta''_3 + \ldots = -2(a'_{21}\delta'_1 + a'_{22}\delta'_2 + \ldots) - (a''_{21}\delta_1 + a''_{22}\delta_2 + \ldots)$$
$$a_{31}\delta''_1 + a_{32}\delta''_2 + a_{33}\delta''_3 + \ldots = -2(a'_{31}\delta'_1 + a'_{32}\delta'_2 + \ldots) - (a''_{31}\delta_1 + a''_{32}\delta_2 + \ldots)$$
$$\ldots\ldots$$
$$a_{11}\delta_1^{(n-1)} + a_{12}\delta_2^{(n-1)} + a_{13}\delta_3^{(n-1)} + \ldots = -(n-1)(a'_{11}\delta_1^{(n-2)} + a'_{12}\delta_2^{(n-2)} + \ldots) - \frac{(n-1)(n-2)}{2}(a''_{11}\delta_1^{(n-3)} + a''_{12}\delta_2^{(n-3)} + \ldots)$$
$$a_{21}\delta_1^{(n-1)} + a_{22}\delta_2^{(n-1)} + a_{23}\delta_3^{(n-1)} + \ldots = -(n-1)(a'_{21}\delta_1^{(n-2)} + a'_{22}\delta_2^{(n-2)} + \ldots) - \frac{(n-1)(n-2)}{2}(a''_{21}\delta_1^{(n-3)} + a''_{22}\delta_2^{(n-3)} + \ldots)$$
$$a_{31}\delta_1^{(n-1)} + a_{32}\delta_2^{(n-1)} + a_{33}\delta_3^{(n-1)} = -(n-1)(a'_{31}\delta_1^{(n-2)} + a'_{32}\delta_2^{(n-2)} + \ldots) - \frac{(n-1)(n-2)}{2}(a''_{31}\delta_1^{(n-3)} + a''_{32}\delta_2^{(n-3)} + \ldots)$$

Digitized by Google

C'est à dire que h prenant successivement les valeurs 1, 2, 3 . . . $(\beta + \nu - 1)$, nous aurons

$$a_{h1}\delta_1 + a_{h2}\delta_2 + a_{h3}\delta_3 + \ldots = 0$$

$$a_{h1}\delta'_1 + a_{h2}\delta'_2 + a_{h3}\delta'_3 + \ldots = -\ (a'_{h1}\delta_1 + a'_{h2}\delta_2 + a'_{h3}\delta_3 + \ldots) \qquad (17)$$

$$a_{h1}\delta''_1 + a_{h2}\delta''_2 + a_{h3}\delta''_3 + \ldots = -2(a'_{h1}\delta_1 + a'_{h2}\delta_2 + a'_{h3}\delta_3 + \ldots) - (a''_{h1}\delta_1 + a''_{h2}\delta_2 + a''_{h3}\delta_3 + \ldots)$$

$$\vdots$$

$$a_{h1}\delta_1^{(n-1)} + a_{h2}\delta_2^{(n-1)} + a_{h3}\delta_3^{(n-1)} + \ldots = -(n-1)(a'_{h1}\delta_1^{(n-} + a'_{h2}\delta_2^{(n-2)} + a'_{h3}\delta_3^{(n-2)} + \ldots) - \frac{(n-1)(n-2)}{2}(a''_{h1}\delta_1^{(n-3)} + a''_{h2}\delta_2^{(n-3)} + a''_{h3}\delta_3^{(n-3)} + \ldots)$$

Rappelons que $\delta^{(p)}_s$ est la dérivée p^e par rapport à x du mineur du s^e terme de la première ligne du déterminant Δ, et que a_{hs} est le coefficient de X_s dans la h^e équation (1).

12. — *Propriétés des sommes de mineurs correspondant aux branches aboutissant à un même nœud*

Supposons que l'une des équations (2) soit, pour un certain nœud, de numéro s,

$$X_f + X_g - X_h - X_j \ldots = 0.$$

Les termes correspondants du déterminant (13) seront :

$$a_{1\beta+s)f} = 1 \quad a_{1\beta+s)g} = 1 \quad a_{1\beta+s)h} = -1 \quad a_{1\beta+s)j} = -1 \ldots$$

Si maintenant nous substituons à la première ligne du déterminant

$$a_{11}\ a_{12}\ a_{13} \ldots\ a_{1f} \ldots\ a_{1g} \ldots\ a_{1h} \ldots\ a_{1j} \ldots$$

Digitized by Google

la ligne

$$0 \quad 0 \quad 0 \ldots . 1 \ldots . 1 \ldots . - 1 \ldots . - 1 \ldots .$$

dont tous lès termes sont nuls, sauf que l'on y a remplacé a_{1f} par 1; a_{1g} par 1; a_{1h} par -1; a_{1j} par -1; ....; nous obtiendrons un déterminant identiquement nul, puisque sa première ligne est identique à sa $(\varsigma + s)^e$ ligne.

Mais ce déterminant nul, développé par rapport aux termes de la première ligne, sera

$$\delta_f + \delta_g - \delta_h - \delta_j + \ldots . = 0. \qquad (18)$$

Cette égalité est une identité qui est vraie, quel que soit x. Il en résulte que les dérivées successives du déterminant, prises par rapport à x, sont aussi nulles quelque soit x; c'est-à-dire que l'on aura

$$\begin{aligned} &\delta'_f + \delta'_g - \delta'_h - \delta'_j + \ldots = 0 \\ &\delta''_f + \delta''_g - \delta''_h - \delta''_j + \ldots - 0 \qquad (19) \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned}$$

Ce théorème peut s'énoncer comme suit :

La somme des mineurs du déterminant Δ *relatifs aux termes de la première ligne qui se trouvent dans les mêmes colonnes que les coefficients* a *relatifs aux courants aboutissant à un même nœud quelconque, pris avec les signes de ces courants, est identiquement nulle, ainsi que toutes ses dérivées prises par rapport à* x, *quel que soit* x.

Digitized by Google

13. — Forme abrégée des équations (12).

En partant de la dernière équation, ce système peut s'écrire :

$$a_{h1}X_{1(n-1)} + a_{h2}X_{2(n-1)} + a_{h3}X_{3(n-1)} + \ldots = 0$$

$$a_{h1}X_{1(n-2)} + a_{h2}X_{2(n-2)} + a_{h3}X_{3(n-2)} + \ldots =$$
$$-(n-1)(a'_{h1}X_{1(n-1)} + a'_{h2}X_{2(n-1)} + a'_{h3}X_{3(n-1)} + \ldots)$$

$$a_{h1}X_{1(n-3)} + a_{h2}X_{2(n-3)} + a_{h3}X_{3(n-3)} + \ldots =$$
$$-(n-2)(a'_{h1}X_{1(n-2)} + a'_{h2}X_{2(n-2)} + a'_{h3}X_{3(n-2)} + \ldots)$$
$$-\frac{(n-2)(n-1)}{2}(a''_{h1}X_{1(n-1)} + a''_{h2}X_{2(n-1)} + a''_{h3}X_{3(n-1)}$$
$$+\ldots)$$

$$\vdots$$

$$a_{h1}X_{1p} + a_{h2}X_{2p} + a_{h3}X_{3p} + \ldots = -(p+1)(a'_{h1}X_{1(p+1)} + a'_{h2}X_{2(p+1)}$$
$$a'_{h3}X_{3(p+1)} + \ldots)$$
$$-\frac{(p+1)(p+2)}{2}(a''_{h1}X_{1(p+2)} + a$$
$$X_{2(p+2)} + a''_{h3}X_{3(p+2)} + \ldots) \quad ($$

$$\vdots$$

$$a_{h1}X_{10} + a_{h2}X_{20} + a_{h3}X_{30} + \ldots = -(a'_{h1}X_{1,1} + a'_{h2}X_{2.1} + a'_{h3}X_{3.1} + .$$
$$-(a''_{h1}X_{12} + a''_{h2}X_{22} + a''_{h3}X_{23} + .$$

Dans ces n équations, h peut prendre successivement les valeurs 1, 2, 3, ... β. Elles représentent donc $n\beta$ équa-

Digitized by Google

tions. Quant aux équations aux nœuds, (11), en les écrivant à partir de la dernière, on a :

$$\begin{aligned}
&\Sigma \pm X_{,(n-1)} = 0\\
&\Sigma \pm X_{,(n-2)} = 0\\
&\Sigma \pm X_{,(n-3)} = 0\\
&\quad\vdots\\
&\Sigma \pm X_{\ p} = 0\\
&\quad\vdots\\
&\Sigma \pm X_{,o} = 0
\end{aligned} \qquad (21)$$

Chacune de ces n équations doit s'appliquer à chacun des $(\nu - 1)$ premiers nœuds ; le système représente donc $n(\nu - 1)$ équations.

14. — Calcul des coefficients $X_{,n-1}$.

La 1re équation (20) et la 1re équation (21) ont les mêmes coefficients que les équations (1) et (2), dont les solutions étaient de la forme K^x.

On aura donc, K_{n-1} étant une constante,

$$\begin{aligned}
&X_{1(n-1)} = K_{n-1}\,\delta_1\\
&X_{2(n-1)} = K_{n-1}\,\delta_2\\
&X_{3(n-1)} = K_{n-1}\,\delta_3\\
&\quad\vdots\\
&X_{(\beta+\nu-1)\,(n-1)} = K_{n-1}\,\delta_{\beta+\nu-1}.
\end{aligned} \qquad (22)$$

Il est bien entendu que, à la fin des calculs, il faudra remplacer les x dans ces expressions par x_q , la racine multiple répétée n fois.

Digitized by Google

15. — Calcul des coefficients $X_{,n-2}$.

Les secondes équations (20) et (21) deviennent, en tenant compte de (22),

$$a_{h1} X_{1(n-2)} + a_{h2} X_{2(n-2)} + a_{h3} X_{3(n-2)} + \ldots = - K_{n-1} (n-1) (a'_{h1} \delta_1 + a'_{h2} \delta_2 + a'_{h3} \delta_3 + \ldots$$

$$\Sigma \pm X_{,(n-2)} = 0.$$

La première peut s'écrire, d'après (17)

$$a_{h1} (X_{1(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta'_1) + a_{h2} (X_{2(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta'_2) + a_{h3} (X_{3(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta'_3) + \ldots = 0 \qquad (23)$$

Quand à la seconde, elle peut s'écrire

$$\Sigma \pm (X_{,(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta') = K_{n-1} (n-1) \Sigma \mp \delta'$$

Mais, au sommet considéré, on a, d'après les identités (19) et quel que soit x

$$\Sigma \mp \delta' = 0.$$

On aura donc

$$\Sigma \pm (X_{,(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta') = 0. \qquad (24)$$

Les équations (23) et (24) ne diffèrent des premières équations (20) et (21) qu'en ce que les $X_{,(n-1)}$ y sont remplacés par les expressions $(X_{,(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta')$. On aura donc encore, K_{n-2} étant une constante :

$$X_{,(n-2)} - K_{n-1} (n-1) \delta' = K_{n-2} \delta,$$

Digitized by Google

d'où l'on déduit

$$\begin{aligned}
X_{1(n-2)} &= K_{n-2}\,\delta_1 + K_{n-1}\,(n-1)\,\delta'_1 \\
X_{2(n-2)} &= K_{n-2}\,\delta_2 + K_{n-1}\,(n-1)\,\delta'_2 \\
X_{3(n-2)} &= K_{n-2}\,\delta_3 + K_{n-1}\,(n-1)\,\delta'_3 \qquad (25) \\
&\vdots \\
X_{(\beta+\nu-1)(n-2)} &= K_{n-2}\,\delta_{(\beta+\nu-1)} + K_{n-1}\,(n-1)\,\delta'_{(\beta+\nu-1)}
\end{aligned}$$

expressions dans lesquelles il faudra faire $x = x_q$.

16. — Calcul des coefficients $X_{,n-3}$.

La troisième équation (20) devient, en tenant compte de (22) et de (25)

$$\begin{aligned}
a_{h1}\,X_{1(n-3)} + a_{h2}\,X_{2(n-3)} + a_{h3}\,X_{3(n-3)} + \ldots. &= -K_{n-2}\,(n-2)\,(a'_{h1}\,\delta_1 + a'_{h2}\,\delta_2 \\
+ a'_{h3}\,\delta_3 + \ldots) - K_{n-1}\,\frac{(n-2)\,(n-1)}{1.2}\Big[2\,(a'_{h1}\,\delta'_1 + a'_{h2}\,\delta'_2 + a'_{h3}\,\delta'_3 + \ldots.) \\
+ a''_{h1}\,\delta_1 + a''_{h2}\,\delta_2 + a''_{h3}\,\delta_3 + \ldots.\Big]
\end{aligned}$$

ou, d'après (16)

$$\begin{aligned}
&a_{h1}\Big[X_{1(n-3)} - K_{n-2}\,(n-2)\,\delta'_1 - K_{n-1}\,\frac{(n-2)\,(n-1)}{1.2}\,\delta''_1\Big] \\
&+ a_{h2}\Big[X_{2(n-3)} - K_{n-2}\,(n-2)\,\delta'_2 - K_{n-1}\,\frac{(n-2)\,(n-1)}{1.2}\,\delta''_2\Big] \qquad (26) \\
&+ a_{h3}\Big[X_{3(n-3)} - K_{n-2}\,(n-2)\,\delta'_3 - K_{n-1}\,\frac{(n-2)\,(n-1)}{1.2}\,\delta''_3\Big] \\
&+ \ldots. \qquad = 0
\end{aligned}$$

Digitized by Google

D'autre part, la troisième équation (21) peut s'écrire

$$\sum \pm \left[X_{,n-3} - K_{n-2}(n-2)\delta' - K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta'' \right] = K_{n-2}(n-2)\sum \mp \delta' - K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\sum \mp \delta'',$$

ou d'après (19)

$$\sum \pm \left[X_{,n-3} - K_{n-2}(n-2)\delta' - K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta'' \right] = 0. \qquad (27)$$

Les équations (26) et (27) ont encore les mêmes coefficients par rapport aux quantités $\left[X_{,n-3} - K_{n-2}(n-2)\delta' - K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta'' \right]$, que les équations (1) et (2) par rapport aux quantités X. On aura donc encore, K_{n-3} étant une nouvelle constante :

$$X_{,n-3} - K_{n-2}(n-2)\delta' - K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta'' = K_{n-3}\delta,$$

et, par conséquent, les valeurs des $X_{,n-3}$ seront

$$\begin{aligned}
X_{1(n-3)} &= K_{n-3}\delta_1 + K_{n-2}(n-2)\delta'_1 + K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta''_1 \\
X_{2(n-3)} &= K_{n-3}\delta_2 + K_{n-2}(n-2)\delta'_2 + K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta''_2 \qquad (28) \\
X_{3(n-3)} &= K_{n-3}\delta_3 + K_{n-2}(n-2)\delta'_3 + K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta''_3 \\
&\vdots \\
X_{(\beta+\nu-1)(n-3)} &= K_{n-3}\delta_{(\beta+\nu-1)} + K_{n-2}(n-2)\delta'_{(\beta+\nu-1)} + K_{n-1}\frac{(n-2)(n-1)}{1.2}\delta''_{(\beta+\nu-1)}
\end{aligned}$$

expressions dans lesquelles il faudra faire $x = x_q$.

Digitized by Google

17. — Valeur du coefficient général $X_{,p}$.

D'après les valeurs (22) (25) (28) de $X_{,n-1}$, $X_{,n-2}$, $X_{,n-3}$, on peut augurer que la valeur de $X_{,p}$ sera

$$X_{s,p} = K_p \delta_s + K_{p+1}(p+1)\delta'_s + K_{p+2}\frac{(p+1)(p+2)}{1.2}\delta''_s + \ldots . K_{p+j}$$

$$\frac{(p+1)(p+2)\ldots(p+j)}{1.2.3.\ldots j}\delta_s{}^{(j)} + \ldots . + K_{n-1}\frac{(p+1)(p+2)..(n-1)}{1.2.3...(n-p-1)}$$

$$\delta_s{}^{(n-p-1)}. \quad (28)$$

Et, en effet, en substituant pour les $X_{,p}$, les $X_{,p+1}$, et $X_{,p+2}$ des valeurs données par la formule (28), dans l'équation générale (20) et en tenant compte des relations (16), on trouve une identité. En substituant ces mêmes valeurs dans l'équation générale (21) et en tenant compte des relations (19), on trouve encore une identité. Tout ceci suppose, bien entendu, que x soit égal à x_q.

On aura donc toutes les valeurs des coefficients X. Les valeurs pour $X_{,1}$ et $X_{,0}$ en particulier seront, d'après l'expression (28) :

$$X_{s,1} = K_1 \delta_s + K_2 2\delta'_s + K_3 3\delta''_s + \ldots . + K_{n-1}(n-1)\delta_s{}^{(n-2)} \quad (29)$$

$$X_{s,0} = K_0 \delta_s + K_1 \delta'_s + K_2 \delta_s{}'' + \ldots . + K_{n-1}\delta_s{}^{(n-1)}. \quad (30)$$

Ainsi, les valeurs des $n(\beta + \nu - 1)$ coefficients X seront déterminées entièrement en fonction des δ, qui, après substitution de $x = x_q$, ne dépendent que des constantes P, m, r du réseau ; sauf les n constantes K_0 K_1 K_2.... K_{n-1}, qui entrent linéairement dans leurs expressions.

Ainsi la racine x_l qui est n^{tuple} a introduit dans les expressions des coefficients X de l'exponentielle $e^{x_q t}$,

Digitized by Google

n coefficients indéterminés K. Il en résulte que, d étant le degré de l'équation Δ en x, il y aura dans les expressions des fonctions i et v, d constantes indéterminées K.

18. — Expression de l'ensemble des termes des fonctions i et v relatifs à l'exponentielle e^{xq^t}.

En nous reportant à l'expression (9) de ces fonctions et en y introduisant les valeurs des fonctions X données par l'expression générale (28), nous trouvons dans la s^e des $(\beta + \nu - 1)$ fonctions i ou v, pour coefficient de e^{xq^t} :

$$\begin{aligned}
&X_{s,0} + X_{s,1}\,t + X_{s2}\,t^2 + \ldots + X_{s\,(n-1)}\,t^{n-1} \\
&= K_0\,\delta_s + K_1\,\delta'_s + K_2\,\delta''_s + K_3\,\delta'''_s + \ldots \qquad + K_{n-1}\,\delta_s^{(n-1)} \\
&\quad + K_1\,\delta_s\,t + K_2\,2\,\delta'_s\,t + K_3\,3\,\delta''_s\,t + \ldots + K_{n-1}\,(n-1)\,\delta_s^{(n-2)}\,t \\
&\quad + K_2\,\delta_s\,t^2 + K_3\,3\,\delta'_s\,t^2 + \ldots + K_{n-1}\,\frac{(n-1)\,(n-2)}{1.2}\,\delta_s^{(n-3)}t^2 \\
&\quad + K_3\,\delta_s\,t^3 + \ldots \quad + K_{n-1}\,\frac{(n-1)\,(n-2)\,(n-3)}{1.2\,3} \\
&\quad \delta_s^{(n-4)}\,t^3 \qquad (31) \\
&\quad + \ddots \qquad \vdots \\
&\quad + K_{n-1}\,\delta t + {}^{n-1}.
\end{aligned}$$

Ou, en notations symboliques :

$$\begin{aligned}
&K_0\left(\frac{d}{dx} + t\right)^0 \delta_s + K_1\left(\frac{d}{dx} + t\right)^1 \delta_s + K_2\left(\frac{d}{dx} + t\right)^2 \delta_s + \ldots + K_p\left(\frac{d}{dx} + t\right)^p \delta \\
&\qquad + \ldots \qquad + K_{n-1}\left(\frac{d}{dx} + t\right)^{n-1} \delta_s. \qquad (32)
\end{aligned}$$

Digitized by Google

Ou encore

$$\sum_{j=0}^{j=n-1} K_j \left(\frac{d}{dx_q}+t\right)^j \delta_s, \qquad (33)$$

l'indice q de dx indiquant qu'on doit, tous calculs faits, substituer x_1 à x.

19. — Expression générale des fonctions i et v. Les conditions aux limites.

Si l'équation caractéristique $\Delta = 0$ du réseau admet λ racines L; μ racines M; π racines Q; . . ., avec la condition que

$$\lambda + \mu + \pi + \ldots = d, \qquad (34)$$

d étant le degré de l'équation Δ, les expressions générales des fonctions i et v seront donc :

$$i_1 = e^{Lt} \sum_{j=0}^{j=\lambda-1} K_{j1} \left(\frac{d}{dx_L}+t\right)^j \delta_1 + e^{Mt} \sum_{j=0}^{j=\mu-1} K_{j2} \left(\frac{d}{dx_M}+t\right)^j \delta_1 + e^{Qt} \sum_{j=0}^{j=\pi-1} K_{j3} \left(\frac{d}{dx_Q}+t\right)^j \delta_1 + \ldots$$

$$i_2 = e^{Lt} \sum_{j=0}^{j=\lambda-1} K_{j1} \left(\frac{d}{dx_L}+t\right)^j \delta_2 + e^{Mt} \sum_{j=0}^{j=\mu-1} K_{j2} \left(\frac{d}{dx_M}+t\right)^j \delta_2 + e^{Qt} \sum_{j=0}^{j=\pi-1} K_{j3} \left(\frac{d}{dx_Q}+t\right)^j \delta_2 + \ldots \qquad (35)$$

$$\vdots$$

$$i_1 = e^{Lt} \sum_{j=0}^{j=\lambda-1} K_{j1} \left(\frac{d}{dx_L}+t\right)^j \delta_{(\beta+\nu-1)} + e^{Mt} \sum_{j=0}^{j=\mu-1} K_{j2} \left(\frac{d}{dx_M}+t\right)^j \delta_{(\beta+\nu-1)} + e_{Qt} \sum_{j=0}^{j=\pi-1} K_{j3} \left(\frac{d}{dx_Q}+t\right)^j \delta_{(\beta+\nu-1} + \ldots$$

Digitized by Google

Rappelons que le symbole $\frac{d}{dx}_{x=R}$ veut dire qu'il faut prendre la dérivée par rapport à x, puis y faire $x = R$.

Ces expressions sont extrêmement simples, relativement à la complication apparente du problème posé.

Remarquons que, pour les obtenir, il suffit :

1° De constituer le déterminant Δ avec l'ordre et la méthode indispensables.

2° De résoudre l'équation algébrique $\Delta = 0$, caractéristique du système.

3° De constituer les mineurs $\delta_1, \delta_2, \delta_3 \ldots$ du déterminant Δ par rapport aux termes de la première ligne.

4° De dériver chacun de ces mineurs un nombre de fois indiqué par le degré de multiplicité maximum des racines de l'équation caractéristique $\Delta = 0$, diminué d'une unité.

5° De substituer dans ces mineurs et dans leurs $(n - 1)$ premières dérivées chacune des racines de l'équation caractéristique, n étant, en général, le degré de multiplicité de chacune des racines.

6° De constituer les polynomes (35).

En somme, sauf la seconde opération, ces diverses opérations sont des plus faciles. Il ne faut pas perdre de vue que, dans la plupart des cas de la pratique, un grand nombre des termes du déterminant Δ sont nuls, ce qui rend les calculs très rapides.

Remarque. — Nous n'avons pas introduit, dans les expressions des fonctions de i et v, de termes constants, indépendants du temps, pour les raisons déjà exprimées à la remarque du § 7.

Quant à ce qui concerne les conditions aux limites, nous ne pouvons que répéter ce qui a été dit au § 8 : c'est-à-dire que, la distribution électrique dans le réseau étant physiquement déterminée, nous devrons pouvoir nous donner, pour déterminer les d constantes K, d condi-

Digitized by Google

tions aux limites physiquement distinctes. Ces d conditions sont nécessaires et suffisantes pour déterminer le problème. Le fait que certaines racines sont multiples peut être attribué, dans la plupart des cas, aux valeurs particulières données aux constantes P m r du réseau.

CHAPITRE II.

CAS LE PLUS GÉNÉRAL OU IL Y A DANS LE RÉSEAU DES FORCES ÉLECTROMOTRICES APPLIQUÉES FONCTIONS DU TEMPS.

20. — Il ne nous reste que peu de chose à dire de ce cas général, après ce que nous en avons dit dans l'introduction.

Cette fois, les équations différentielles en v et i auront un second membre. Il suffira de déterminer une solution particulière des équations avec second membre, et de l'ajouter à l'expression (35) correspondante de la réaction du réseau, pour obtenir l'expression générale de la fonction i ou v considérée. Les d constantes K se détermineront encore par les conditions aux limites.

Ainsi que nous l'avons dit, cette solution particulière peut correspondre à la distribution à l'état de régime, pour autant que cette distribution existe. Il en sera ainsi pour les forces électromotrices constantes et les forces électromotrices susceptibles de se mettre sous la forme d'une somme d'exponentielles du temps. Telles seront les forces électromotrices périodiques, simples ou munies d'harmoniques, plusieurs forces électromotrices de grandeurs et de fréquences différentes pouvant exister dans chacune des branches du réseau.

Digitized by Google

Dans le cas de forces électromotrices exponentielles, une méthode analogue à celle que nous avons employée dans l'étude de la réaction du réseau, permettra de déterminer très simplement cet état de régime.

En effet, cet état est dû à la superposition des états dûs à chacun des groupes de forces électromotrices différents et caractérisés par le multiplicateur du temps t dans l'exposant de l'exponentielle. Il suffira donc de déterminer l'état de régime dû à chacun de ces groupes.

Soit par exemple f le multiplicateur constant caractéristique du groupe, et $F_1 e^{ft}$; $F_2 e^{ft}$; $F_3 e^{ft}$ ... $F\beta e^{ft}$ les forces électromotrices appartenant à ce groupe, et appliquées respectivement dans les branches 1, 2, 3 . . . β du réseau.

Soient encore v et i les potentiels aux nœuds et les intensités de courants dans les branches du réseau.

Posons $i_1 = Y_1 e^{ft}$ $i_2 = Y_2 e^{ft}$ .... $i_\beta = Y_\beta e^{ft}$ (36)

$$v_1 = Y_{\beta+1} e^{ft} \quad v_2 = Y_{\beta+2} e^{ft} \ldots . \quad v_{\nu-1} = Y_{\beta+\nu-1} e^{ft}$$

$$v_\nu = 0$$

les quantités Y étant constantes.

En substituant ces valeurs dans les équations différentielles en i et v, et divisant par e^{ft}, nous obtenons

1° β équations aux branches

$$f^2 \sum_{s=1}^{s=\beta} m_{hs} Y_s + f(Y_{\beta+e} - Y_{\beta+k} + r_h Y_h) + P_h Y_h = f F_h \quad (37)$$

dans lesquelles h prend successivement les valeurs 1, 2, 3, ... β.

2° $(\nu - 1)$ équations aux nœuds :

$$\Sigma Y = 0 \quad (38)$$

Digitized by Google

soit en tout $(\beta + \nu - 1)$ équations linéaires en $Y_1\ Y_2\ Y_3$ .... $Y_{\beta+\nu-1}$, mais non homogènes. On en tirera aisément les valeurs de ces coefficients Y.

Pour le groupe des forces électromotrices appliquées constantes, on a $f = 0$. Il en résulte d'abord que dans toutes les branches contenant un condensateur, c'est-à-dire comportant un terme P différent de zéro, la quantité Y relative à ces forces électromotrices est nulle. Pour les branches ne renfermant pas de condensateurs, P est nul et l'équation (37) se réduit à

$$Y_{\beta+l} - Y_{\beta+k} + r_h\ Y_h = F_h$$

équation indépendante des coefficients d'induction.

(*Applaudissements.*)

M. De Bast, *président.* — Je félicite M. Colard de la belle étude qu'il vient d'exposer avec la précision et la clarté qui lui sont habituelles, et je l'en remercie au nom de l'Assemblée. Le sujet qu'il a traité étant assez abstrait, je pense que la discussion de cette communication ne pourrait utilement être abordée que lorsque nous aurons pu en lire le compte-rendu au *Bulletin. (Adhésion.)*

L'heure étant trop avancée, M. De Bast propose d'ajourner à la prochaine séance l'exposé de la suite de son étude sur les éléments de calcul des générateurs électriques à courants alternatifs. *(Adopté.)*

La séance est levée à midi et demi.

Digitized by Google

SÉANCE DU 31 OCTOBRE 1897.

Présidence de M. De Bast, président.

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DES MEMBRES EFFECTIFS.

Il est procédé à l'élection de quatre Vice-Présidents et de sept Commissaires pour l'année sociale novembre 1897 à octobre 1898 inclus.

Prennent part au vote : MM. Alfieri, André, Andrews, Antoniotti, Bede, Berlow, Bourquin, Briffaux, Callet, Cassa, Coops Busgers, Crombé, De Bast, Debavelaere, Decroës, de Gnoïnski, Della Giusta, Del Proposto, De Meglitzky, Derclaye, de Sauteiron, Dewandre, de Woyciechowski, D'Hoop, Doppler, Duchesne, Exelbirth, Feron, Fontaine H , Francken, Goldschmidt, Henrard, Henrion, Herard, Hourko, Jullien, Kniphorst, Kroll, Lechat C., L'Hoest, Libert, Limauge, Masson, Mathieu, Maus, Melotte, Nicolini, Nobili, Noirfalise, Nuzzaci, Picard, Pirard L , Poenaru, Quinaux, Robert P., Roosen, Sée, Semenza, Tcherniak, Theunis, Van der Hecht, Van der Wallen, Van Dooren, Van Musschenbroek, Van Rijn, Van Vloten, Verdeleanu, Ver Eecke, Viscidi, Vodopianoff, Wilmet, Winslow. (Un bulletin parvenu sous enveloppe, datée de Londres, non signée extérieurement, a été annulé.)

Sont élus :

Vice-Présidents : MM. Dawson, De Bast, Henrard et Pescetto.

Commissaires : MM Bayet, Briffaux, Colard, Francken, Melotte, Pierard et Van Kesteren.

Digitized by Google

Construction des lignes de tramways à traction électrique.

(Suite de la communication de M. Van Kesteren, fascicules 5, 6, 7, 8, 9, 10 de 1897, pages 195 à 244 et 300 à 328.)

Ligne Bois de la Cambre — Schaerbeek.

La ligne Bois de la Cambre — Schaerbeek, récemment mise en exploitation, est à traction électrique souterraine et doit être classée parmi les applications du système à caniveau de côté ou sous le rail. Les conducteurs électriques de polarités inverses sont, en effet, logés dans une conduite placée en dessous du rail gauche de roulement Ici, le retour du courant ne se fait pas par les rails ; le caniveau contient deux conducteurs distincts, l'un positivement électrisé, l'autre négativement. Par cette disposition, les effets d'électrolyse sont réduits à leur minimum, ce qui est d'une grande importance pour les voies de communication encombrées de conduits métalliques de toutes espèces, comme c'est le cas à Bruxelles.

La ligne du Bois — Schaerbeek traverse les principales artères de la ville et des faubourgs, telles que la rue Royale, la rue de la Régence, une partie des boulevards circulaires et l'avenue Louise. La longueur totale est d'environ 16 500 mètres de simple voie, y compris les liaisons. La différence de niveau entre Schaerbeek et l'extrémité de la ligne au Bois est de + 50 mètres ; le maximum de rampe est de 31 mm par mètre dans la rue de la Régence, soit environ l'inclinaison du plan incliné de Liége. On peut, cependant, dire que la différence d'altitude des points extrêmes est rachetée par un

Digitized by Google

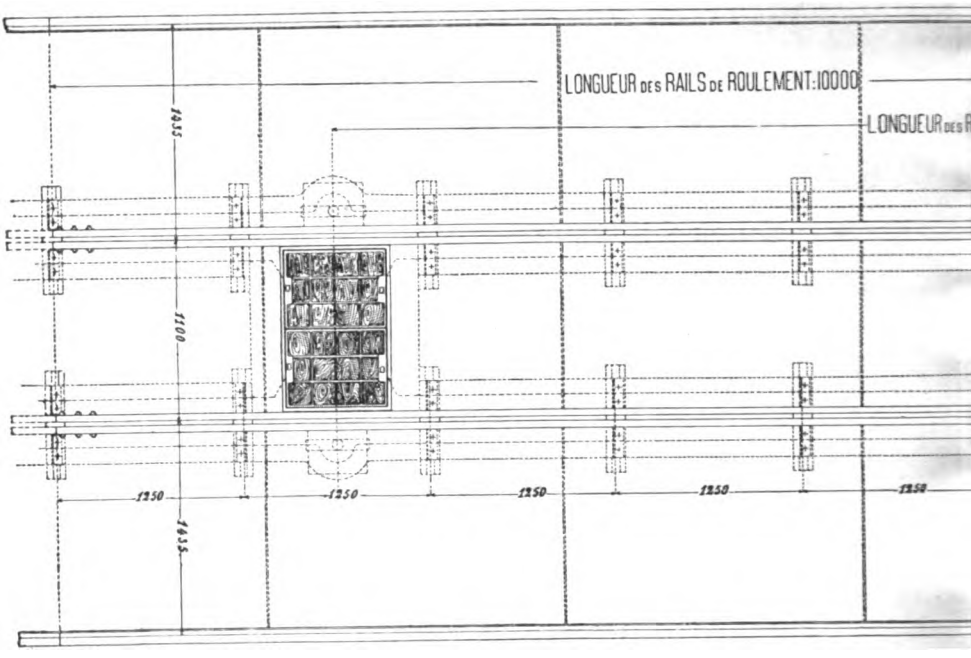


Fig. 27. — Vu

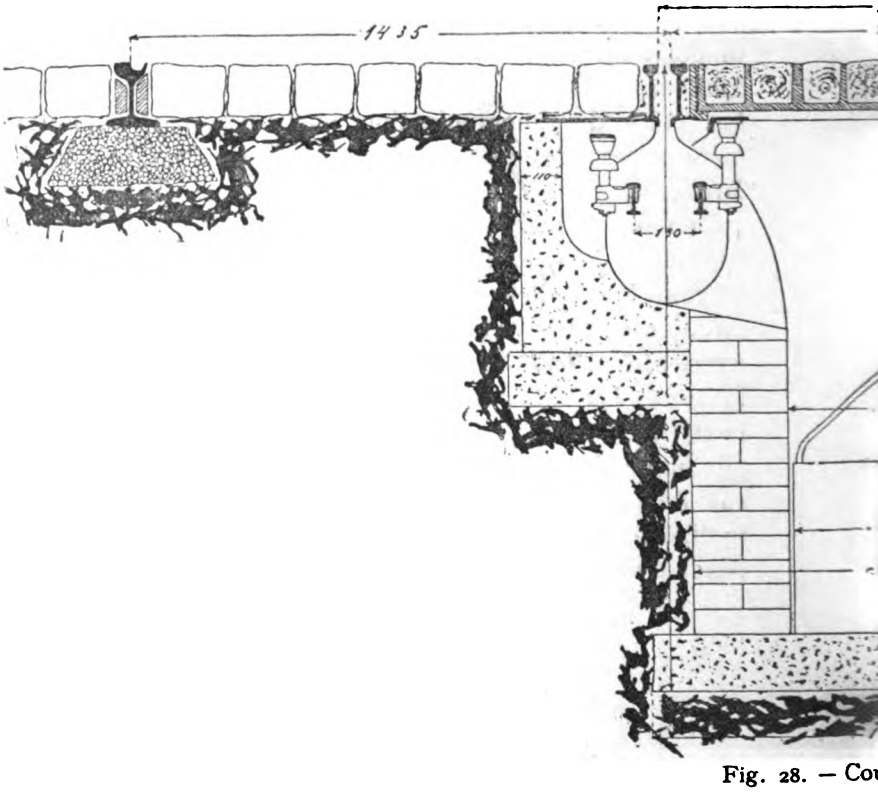
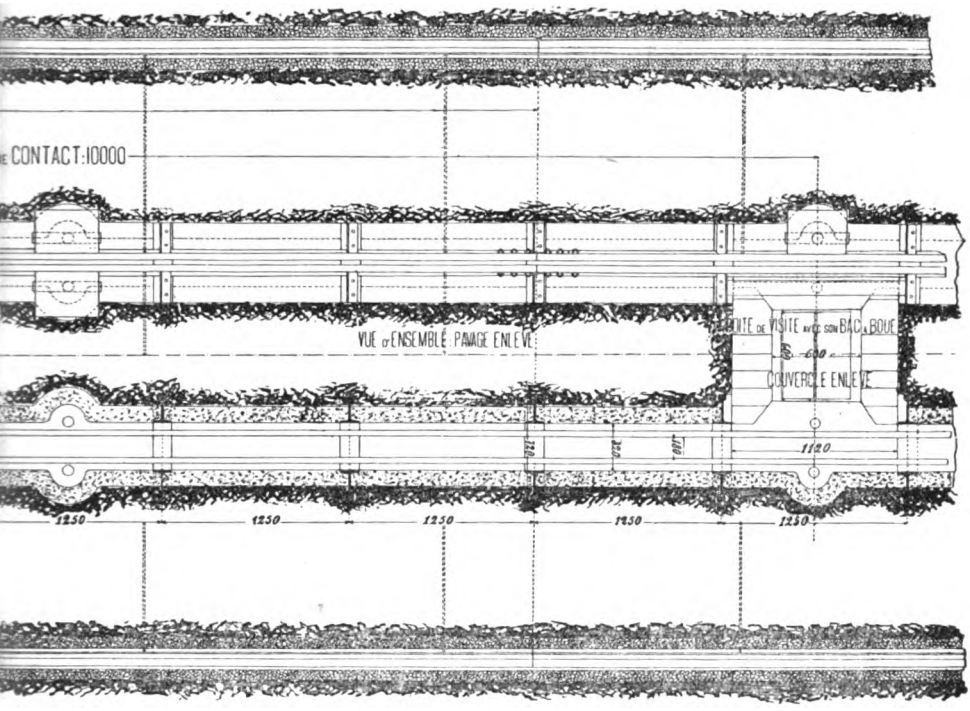
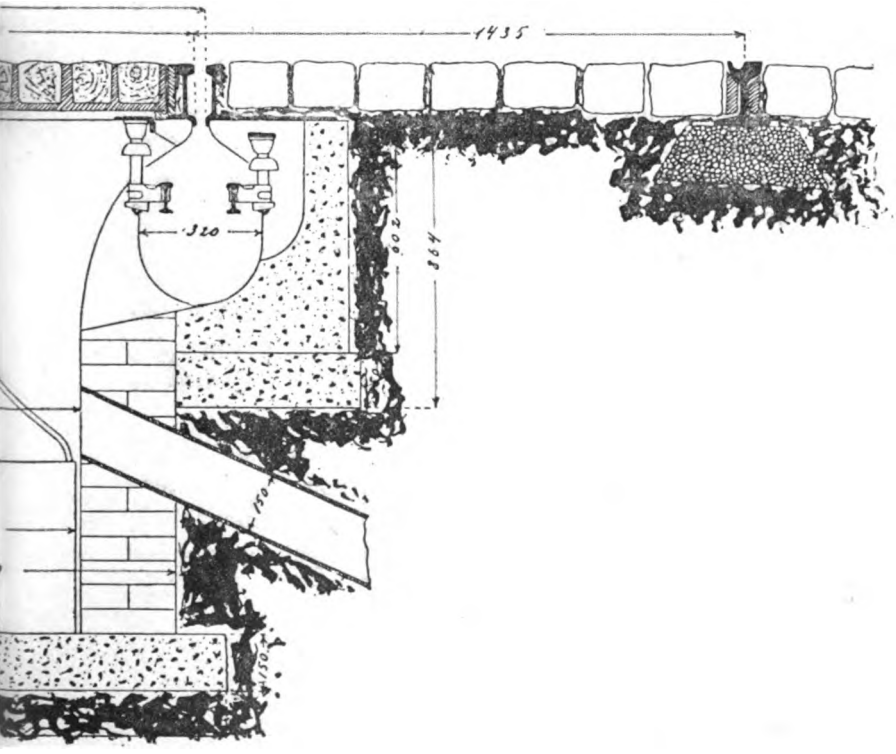


Fig. 28. — Co

Digitized by Google



nérale en plan.



ar un puisard.

Digitized by Google

profil assez régulier, montrant un abaissement de niveau graduel depuis le Bois jusqu'au dépôt des trams à Schaerbeek. Il y aurait peut-être lieu d'en excepter la rue de la Régence, qui possède une fosse à l'endroit du Petit Sablon : on y remarque, en effet, une pente de 21 mm, suivie d'une partie en palier, puis d'une rampe de 10 mm et de 31 mm. Mais ces alternances d'inclinaison ne se produisant pas sur des longueurs considérables, n'occasionnent pas de grandes irrégularités de profil dans la coupe en long de la ligne. Celle-ci est reliée électriquement à la station centrale, située rue Brogniez, au moyen de 3 feeders de longueurs : 2 000 mètres, 3 100 mètres et 3 600 mètres approximativement. L'usine de production de force motrice a donc une situation très excentrique par rapport au réseau qu'elle est destinée à alimenter, ce qui doit influencer défavorablement le rendement total de l'installation. Pour faciliter la description détaillée du caniveau et de ses accessoires, je diviserai l'ensemble de la construction en son squelette et en ses matières de remplissage. J'entends par le premier les éléments destinés à supporter toutes les fatigues et à maintenir les distances respectives des différentes parties de la conduite : j'y rangerai donc les fondations, les châssis en fonte, les rails, les isolateurs, les conducteurs électriques. Les matières de remplissage, par contre, comprennent les parties constituantes qui font du squelette un tout bien distinct : parmi elles, je citerai en premier lieu le béton entre les châssis successifs, puis les puisards et les trous de visite avec leurs couvercles.

Considérons d'abord la voie droite sans appareils spéciaux, dont les vues en plan et en coupe sont représentées par les figures 27 et 28. Des deux rails de roulement de la voie, l'un, celui de gauche, est supporté par des châssis en fonte qui, eux, sont placés sur une fondation en béton.

Digitized by Google

Celle-ci a généralement une épaisseur constante de 15 cm, mais il va de soi qu'un renforcement est nécessaire en terrain meuble. Le cas s'est présenté à l'avenue Louise, où on a été obligé de donner à la fondation une importance considérable pour assurer à la construction une stabilité suffisante. L'examen du terrain doit guider l'ingénieur dans la détermination de l'épaisseur de l'assise. La composition du béton est d'une partie de ciment Confestu à prise lente, 4 parties de sable à grains fins pour 8 parties de gravier fin de Lessines ou de Quenast, soit 1 — 4 — 8. C'est donc un béton maigre, correspondant sensiblement au dosage 2 — 4 avec une teneur approximative de 70 kgs de ciment au mc de béton. Il est impossible de déduire théoriquement de cette donnée la résistance à la compression, mais on peut admettre qu'elle ne doit pas être élevée en s'inspirant des essais de M. Candlot, qui indique pour un dosage 2 — 4 et une teneur de 151 kgs de ciment au mc de béton, une résistance à la compression de 97 kgs par c mq après 27 jours, la composition du mortier étant la même que celle dont il est question ci-dessus. L'emploi d'éléments de même volume et de formes anguleuses, procurant un vide qu'on peut évaluer entre 40 et 50 %, n'est pas fait pour dissiper des craintes au sujet de la solidité de la fondation, telle qu'elle a été construite.

Je rappellerai ici que, dans le choix du meilleur squelette, on doit faire intervenir deux principes généraux :

1° La réduction du vide dans l'ossature, de manière à diminuer l'existence de poches à mortier qui sont des zônes de moindre résistance ;

2° La réduction dans le développement total des surfaces de joints entre pierrailles et mortier, car les essais à la compression montrent que la dislocation du béton s'annonce aux joints entre éléments du squelette et agglomérant.

Digitized by Google

Le 1er conduit à l'emploi d'éléments de grosseurs variables et le 2e à l'utilisation de gros cailloux. Pour concilier ces deux conditions, on prendra des pierres inégales passant de 0m02 à 0m06.

Sur la fondation bien plane sont placés les châssis ou supports en fonte, distants de 1m25 d'axe en axe. Dans leur fabrication, l'emploi de fonte grise de seconde fusion a été prescrite. En dehors de cette clause des cahiers des charges, des conditions de résistance, d'écarts des mesures et de formes ont été imposées. Les châssis, bien soutenus par la base, doivent résister à une compression de 20 tonnes exercée en un point situé à 25 mm d'une des arêtes de la rainure sur la face d'au-dessous. Ce centre de pression correspond sensiblement avec le milieu de la rainure. L'essai de compression, fait d'un côté de celle-ci, sera répété de l'autre ; le châssis ne pourra déceler la moindre fêlure après ces épreuves.

Pour pouvoir se rendre compte plus exactement de la manière dont les châssis se comporteront dans leur application, on peut leur faire subir des essais répétés au choc qui les placent approximativement dans des conditions analogues à celles qu'ils sont appelés à remplir. Il est clair qu'il est illogique d'imposer aux supports métalliques des résistances en dehors de proportion avec la solidité dont la fondation est capable : celle-ci étant la base de toute la construction, il faut lui donner un pouvoir résistant suffisant et en déduire ensuite les charges d'épreuve à faire subir aux châssis.

On joindra à ces conditions d'épreuve, rationnellement établies, les tolérances admissibles pour les écarts de formes et de dimensions. Le montage d'un caniveau souterrain exige des soins minitieux et un ajustage quasi-parfait, il est donc de toute importance que les constructeurs maintiennent les mesures des plans dans d'étroites

Digitized by Google

limites. Pour les fondeurs, cela est particulièrement difficile en raison de l'inégale distribution des masses, cause de contractions variables et de changements de formes capricieuses. On ne peut demander à une fonderie de ménager dans des pièces, comme les châssis, des trous de boulons cylindriques, de diamètres exacts et distants d'une telle ou telle mesure. L'expérience acquise à Bruxelles a, une fois de plus, confirmé ce fait. La figure 30 montre que le châssis est muni à sa face supérieure de plusieurs trous de boulons pour permettre la fixation des équerres. Dans bon nombre de ces derniers, il a fallu retailler des trous pour permettre le passage des boulons d'attache. Tout ce travail, très onéreux, eut pu être évité en adoptant les trous forés. Il est vrai que le forage ne procure pas toute économie, car l'opération est coûteuse, mais il est permis de croire qu'en la pratiquant, on y aurait trouvé avantage sous tous les rapports : suppression de main-d'œuvre considérable, accélération dans le montage et facilité dans les réparations futures.

Les châssis sont recouverts d'amiante imbu d'huile de lin cuite, sur une certaine partie de la surface dessinant le caniveau : depuis leur surface supérieure jusqu'à la hauteur du patin du rail de contact environ. Cette précaution aurait pour but d'éviter des courts-circuits, en cas où les conducteurs électriques viendraient à fléchir latéralement d'une façon exagérée. Elle me parait cependant bien illusoire, car l'amiante, fut-il saturé d'huile de lin cuite, ne manque pas de se désagréger rapidement ; ensuite, il est fort difficile de le fixer convenablement sur la fonte, il finit toujours par se détacher. Le mastic isolant employé se compose d'un mélange de blanc de zinc avec de l'huile de lin cuite et du caoutchouc naturel dissous dans la benzine. Pour augmenter le pouvoir soi-disant isolant de l'amiante, on l'a recouvert d'un vernis

Digitized by Google

Chatterton qui, à lui seul, eut suffi au but qu'on s'était proposé d'atteindre.

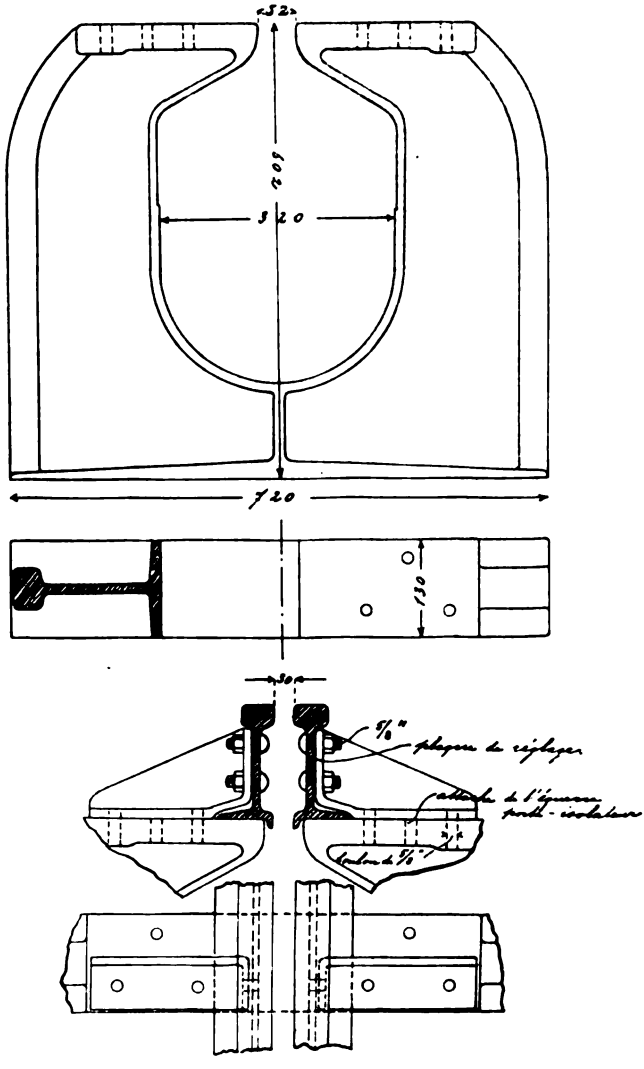


Fig. 30. — Châssis avec mode d'attache

Digitized by Google

Comme je le disais plus haut, aux supports sont fixés les équerres qui maintiennent les rails, dont l'âme est percée de deux trous pour le passage des boulons d'attache aux équerres. Celles-ci sont en acier doux embouti, avec nervure latérale. Les efforts auxquels ce mode d'attache est soumis, se répartissent, par conséquent, sur la moitié de la surface supérieure du châssis au lieu de se transmettre sur toute l'étendue. Il y a là une dissymétrie qui peut avoir pour effet de gauchir le châssis ; j'ai pu observer ce fait pendant la construction de la ligne. Entre les équerres et l'âme des rails, on intercale, selon les nécessités, une ou deux plaques en acier, de 1 à 2 mm d'épaisseur, pour effectuer le réglage de la rainure, qui en voie droite, doit avoir une largeur de 30 mm. Par ce dispositif, on peut donc régler à 1 mm près avec un écart de 8 mm au maximum. A première vue, cette méthode paraît très efficace, mais en tenant compte de la rouille qui rongera peu à peu les plaques d'ajoute, on conviendra que le système laisse à désirer. Les rails ne seront plus maintenus convenablement, la rainure n'aura plus sa largeur normale et on aura à effectuer des réparations fréquentes, probablement. Le moyen de réglage le plus efficace eut certainement été un forage convenable des trous de boulons, tant dans les supports que dans les équerres ; je ne parle pas des rails, car, en raison de leur mode de fabrication, il ne peut être question que de trous forés. Pour la surface de roulement au-dessus du caniveau, on a adopté le rail en acier, type Haarmann, c'est à dire le genre Vignole, à âme élevée, du poids de 26 kgs au mètre courant, d'une hauteur totale de 152 mm et d'une longueur de 10 mètres. Le patin est replié d'un côté pour former rainure. Le profil est, par conséquent, dissymétrique, ce qui a pour effet de donner au rail une certaine courbure au sortir du laminoir et après refroi-

Digitized by Google

dissement. Il est concave du côté du patin replié, où la surface d'émission de charbon est la plus forte et le refroidissement plus rapide. Un redressement s'impose pour rendre possible le montage du rail. La rainure est limitée par deux rails Haarmann, dont l'un est destiné au roulement, l'autre ayant pour but de retenir le pavage. Du côté droit de la voie on place un rail en acier du type Broca, pesant 30 kgs au mètre courant, mesurant 10 mètres de longueur comme le Haarmann. Il repose sur du ballast composée de gravier, de granit, gros en dessous, plus fin au-dessus où il sert de support au rail.

Une condition essentielle de bon ballastage est de saturer les cailloux de sable fin, de manière à combler les vides et de bourrer les pierres contre le patin du rail.

Comme il a été dit plus haut, le circuit électrique est constitué par deux conducteurs logés dans le caniveau (voir fig. 27 et 28) et maintenus par des isolateurs spéciaux distants de 5 à 5 mètres. En fait de conducteurs, on a adopté un rail en acier doux, en forme double T, pesant 9 kgs par mètre courant et mesurant 10 mètres aux 2 mm près, destinés à balancer les dilatations. L'emploi de tels rails parait rationnel, au point de vue des efforts de flexion qu'ils sont appelés à subir, tels que la pression de la prise de courant (4 kgs en moyenne) et leur propre poids, mais le maniement en est difficile ainsi que le cintrage, à cause de leur grande facilité de fléchir. Ils paraissent mieux appropriés dans les courbes que les fils en cuivre employés dans la conduite souterraine de New-York et qui nécessitent de nombreux supports. Les isolateurs utilisés sur la ligne du Bois sont représentés, fig. 29, dans laquelle A indique un isolateur principal, portant deux extrémités de conducteurs, tandis que B est l'image d'un isolateur intermédiaire, n'ayant pour destination que de supporter les conducteurs en leur milieu, si cela devient nécessaire

Digitized by Google

Cette nécessité ne s'est pas fait attendre, car on s'est aperçu, un peu tard, qu'il n'avait pas suffisamment été tenu compte de la flexion du conducteur sous son propre poids. Cet effet est tel, que le rail de contact repose parfaitement dans la rigole de l'isolateur, ce qui double les éventualités d'un court-circuit et diminue dans la même proportion la résistance à l'isolement.

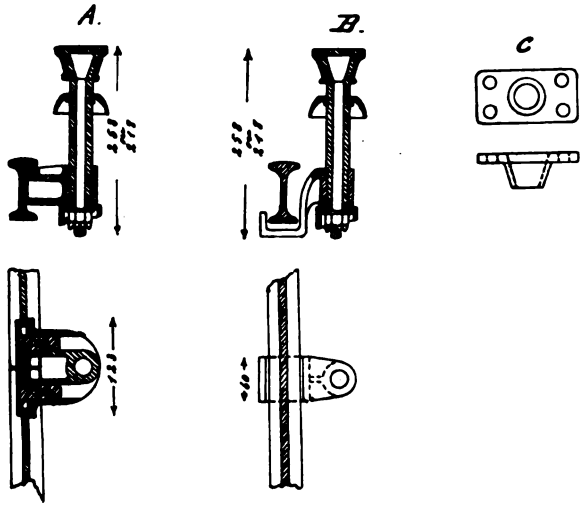


Fig. 29. — Isolateurs et porte-isolateurs.

Dans la fig. 29, C représente le porte-isolateur destiné à soutenir l'isolateur par la tête ; cette pièce repose sur 2 cadres ou est encastrée dans le béton du caniveau, comme le montre la vue en plan, fig. 27 ; celle-ci indique en même temps l'emplacement des isolateurs principaux (dans l'axe des puisards et des trous de visite) et celui des isolateurs intermédiaires (entre deux trous de visite ou entre un puisard et un trou de visite). Il est facile de voir par les figures qu'on a ménagé dans les rails de contact et aux extrémités des trous de 22 mm de diamètre,

Digitized by Google

appelés à recevoir les bouts d'une connexion électrique en cuivre, fixée d'une manière analogue à celle des rails Harmann et Broca (voir fig. 31, A, B et C). Les liaisons électriques des rails de roulement, inutiles en principe dans l'application du caniveau souterrain à double conducteur, ont été prévues dans le but de fournir aux lignes aériennes, en communication avec la ligne du Bois, un

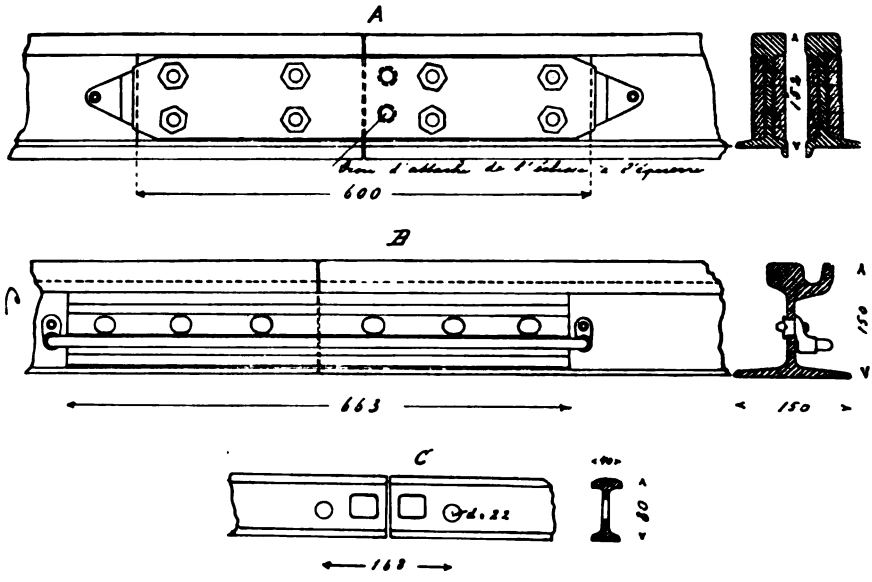


Fig. 31 — Connexions électriques.

retour de courant convenable ; probablement aussi a-t-on voulu tenir compte de dérangements possibles dans le fonctionnement de la ligne souterraine Je ne puis m'expliquer autrement l'existence de ces connexions électriques, très coûteuses, appliquées sur toute la longueur des voies. Elles paraissent très bien conçues : leur fixation dans l'âme des rails est sûre et rapide et la surface de

Digitized by Google

contact est assez considérable sans qu'on ait été obligé de donner au cuivre des dimensions exagérées

La seule objection qu'on pourrait soulever est l'impossibilité d'enlever la connexion sans l'abimer du coup : la fig. 31 montre, en effet, que la gaine traversée par le coin conique rond est repliée à une extrémité par le passage de ce coin. Pour ôter la connexion hors de l'âme du rail, on repousse le coin et on est le plus souvent obligé d'abattre au ciseau les parties repliées de la gaine, elle est perdue par conséquent. Jusque maintenant, on n'est pas encore parvenu à résoudre le problème d'une connexion électrique convenable, sous tous les rapports. Il est probable que la solution réside dans la recherche d'un éclissage qui non seulement assure la liaison mécanique des rails, mais assure également leur liaison électrique

En Amérique, le joint «coulé» semble prendre de l'extension, d'après M. Newkirh, qui, dans un Congrès récent des maîtres fondeurs, donnait quelques détails sur sa méthode de jointement. Elle consiste à serrer les extrémités des rails entre une espèce d'étau et à couler du métal dans les joints. La résistance électrique d'un tel « éclissage fondu » serait inférieure à celle d'une même longueur de rail. On objecte souvent qu'une voie continue ne permet pas la dilatation des divers tronçons, mais on peut y répondre en faisant remarquer que les rails ne subissent jamais des alternances de température considérables. Au surplus, si l'on craint une déformation de la voie ou des ruptures de rails, on peut, de distance en distance, faire un éclissage ordinaire. Je me passe d'une description détaillée des isolateurs ; les figures me paraissent suffisamment claires. Elles montrent qu'il y a un double isolement : le courant électrique doit traverser deux fois l'ébonite pour passer du rail de contact à la terre.

Digitized by Google

Le point le plus délicat dans la construction d'isolateurs semblables est le choix d'une matière isolante résistante, ne se fissurant pas et possédant assez d'élasticité pour suivre les déflections de l'âme métallique, sans se déchirer. A Bruxelles, on a fait emploi de gutta dur, un ébonite assez tendre qu'on presse à chaud sur la tige en fer doux. Après cette opération de revêtement, on place l'isolateur au tour pour lui donner du poli et les dimensions prescrites. Cette opération est très délicate et doit être soigneusement faite pour éviter des fissurements imperceptibles à l'œil nu, mais visibles à l'essai d'isolement. Celui-ci se pratique en mettant l'extrémité inférieure nue de l'âme en métal en communication avec une des bornes d'une bobine de Rhumkorff, pouvant fournir 5 000 volts ; sur la tête de l'isolateur, munie de son revêtement isolant, on place une éponge mouillée reliée à la seconde borne de la bobine. Un défaut d'isolement se manifeste par une gerbe d'étincelles.

Pour maintenir la constance de l'écartement entre les files de rails, il a été fait usage d'entretoises reliant les deux surfaces de roulement d'une même voie entre elles et avec celles de l'autre voie. Passant ensuite au remplissage, j'aurai à citer, en premier lieu, les parties bétonnées entre les châssis : elles sont constituées par des blocs en béton façonnés d'avance ou par du béton pilonné sur place. Ce dernier mérite la préférence, parce que son emploi supprime le rejointement entre châssis « béton », toujours difficiles à faire solidement. De plus, on n'a pas à craindre le bris des blocs à leur mise en place. Pour le constructeur, le pilonnage sur place a encore le grand avantage de ne pas nécessiter la fabrication à l'avance des blocs ; il peut donc réduire son personnel et atteindre plus rapidement son but. Il évite du coup la fissuration des blocs transportés du chantier de leur fabrication jus-

Digitized by Google

qu'au lieu d'utilisation. Les fissures à peu près imperceptibles font bientôt sentir leurs effets, à tel point qu'on a dû remplacer à Bruxelles la presque totalité des blocs coulés d'avance. Généralement, on adopta le béton sillonné, suivant en cela la pratique de la maison Siemens et Halske, constructeur de la ligne souterraine à Budapesth. L'espace à bétonner était confiné par un moule en plusieurs pièces en bois recouvert de tôle de fer bien lisse pour faciliter le dégagement au démoulage Ensuite, le béton préparé sur place était versé par petites quantités aux endroits voulus. Après chaque versement, on opérait un pilonnage au moyen de dames armées de fer à la tête. Le même procédé était utilisé pour la fondation qui se construisit par coffrage.

Le pilonnage a pour but de rendre compact le monolithe en comprimant le mortier et en faisant glisser les pierrailles dans la pâte, de façon que chaque pierre soit enveloppée de gangue. Le béton gagne en imperméabilité et en résistance ; cette dernière, par un damage bien exécuté, peut augmenter d'un quart. On conçoit que les bétons à petits éléments demandent un pilonnage plus énergique et qu'un excès d'eau dans le mortier est à éviter, pour que la masse ne fuie pas sous l'action des dames. En somme, il faut faire usage d'un mélange aussi parfait que possible de ciment, sable et pierraille arrosé de la quantité d'eau strictement nécessaire.

La composition du béton pour le caniveau était de 1 — 3 — 6, soit un de ciment Confestu à prise lente pour trois de sable fin et six de gravier de Quenast. L'emploi des gros éléments pour le squelette n'est pas possible en ce cas, parce qu'il s'agit d'obtenir des surfaces lisses sans grande rugosité avec de faibles épaisseurs (12 cm au maximum).

Après démoulage, les parties pilonnées sont lissées sur

Digitized by Google

les surfaces du caniveau au moyen de la truelle et les joints entre châssis et monolythe sont achevés.

Le dosage du béton montre qu'il ne faut pas espérer une imperméabilité parfaite ni une résistance considérable. Il suffit, pour le vérifier, de consulter les remarquables essais de M. Candlot sur les ciments et bétons compilés, dans son ouvrage « *Ciments et chaux hydrauliques* ».

Une grande imperméabilité paraît cependant désirable pour diminuer, autant que possible, l'humidité à l'intérieur de la conduite ; une forte résistance s'impose surtout à la partie supérieure recourbée du caniveau à l'endroit où les pierres de pavage viennent se placer contre les rails. Cela est tellement vrai, qu'on a dû recouvrir les demi-unités de tôles de fer, qui sont appelées à supporter partiellement les fatigues du pavage.

Il ne faut pas perdre de vue que la difficulté de rendre solide une conduite bétonnée réside principalement dans l'absence d'une voûte complète : elle n'est qu'interrompue à la clef, de sorte que les réactions à la naissance ne se réunissent plus en efforts de tractions et de compressions ; il y a flexion, au contraire, et l'on sait que le béton supporte très mal ce genre de fatigue.

La vue en plan, fig. 27, représente les niches qu'on a ménagées pour l'emplacement des isolateurs : j'ai déjà dit ci-dessus que les isolateurs principaux étaient supportés par deux châssis, tandis que les isolateurs intermédiaires ont leurs supports encastrés dans le béton de leurs niches respectives. L'ouverture est fermée au moyen de tôles de fer reposant sur le rail Haarmann et sur le béton des niches.

La visite et les réparations des isolateurs principaux sont facilitées par la présence de trous de visite qui se transforment de 40 en 40 mètres en puisards, destinés au

Digitized by Google

recueillement des eaux et boues qui s'accumuleraient dans le caniveau. L'emplacement de ces puisards n'est pas absolu, en ce sens qu'il faut se guider d'après l'inclinaison plus ou moins accentuée du profil en long, la largeur de voie à drainer et la présence d'égoûts de dimensions suffisantes.

La coupe, fig. 28, montre la communication du puisard à l'égoût : elle s'effectue par un tuyau en ciment armé sans siphon : un simple clapet à rabattement forme obturateur très défectueux en fait, car il suffit de peu de chose pour que l'obturation ne fonctionne plus dans les conditions voulues. Les réclamations au sujet d'émanations d'égoût, non-seulement désagréables, mais dangereuses pour la santé publique, semblent y trouver leur justification.

L'expérience saura dissiper ces craintes, espérons-le !

Dans chaque puisard est placé un bac en tôle appelé à faciliter l'enlèvement des bornes. Les trous de visite et les puisards sont couverts au moyen de plaques en fonte garni de bois asphalté qu'on retire avec des crochets spéciaux. En dehors des nettoyages, dont il vient d'être question, on est obligé de balayer la conduite avec une espèce de râcle pour éviter l'accumulation de débris de toutes natures capables d'interrompre le bon fonctionnement du système. Le balayage mécanique par une voiture, destinée à ce but, paraît difficile d'exécution à cause des courbes et des aiguillages.

Les courbes ne présentent, par rapport à la ligne droite, aucune particularité, si ce n'est la disposition excentrique des deux voies, c'est à dire que les voies d'aller et retour ont deux centres de courbure distincts, mais situés sur la bissectrice commune de l'angle de courbure. L'écartement des deux centres est fonction de cet angle et du

Digitized by Google

rayon ; il est facile de s'en convaincre en examinant la fig. 32, qui explique la construction de ce dispositif.

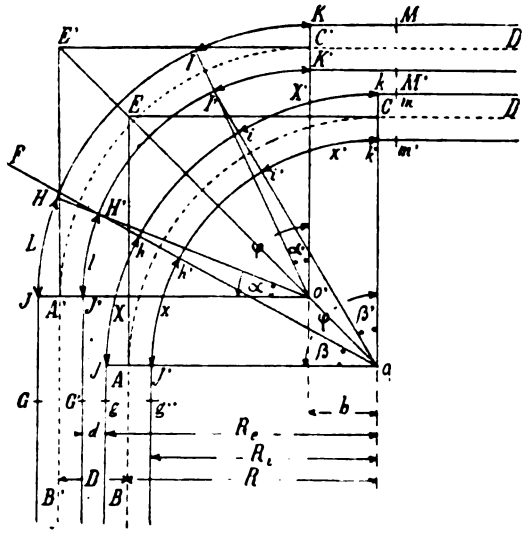


Fig. 32.

Soient AB et CD les axes de deux tronçons de ligne à relier par une courbe-circonférence à partir d'un point A pris sur l'un des tronçons. Pour trouver le rayon R, ainsi que le centre O, prolongeons AB et CD jusqu'à leur rencontre en E. Menons la bissectrice EO de l'angle AEC, supplément de l'angle de courbure CEF. Le point O, intersection de la bissectrice EO avec la perpendiculaire AO élevée sur AB au point de naissance A de la courbe, sera le centre cherché. Le rayon R sera représenté par AO ou CO. Pour relier les deux tronçons A'B' et C'D' faisant partie de la seconde voie, prolongeons-les jusqu'à leur rencontre en E', point qui sera évidemment situé sur la ligne EO déterminé précédemment.

A partir de ce point E', prenons des longueurs E'A' et

Digitized by Google

E'C' égales à EA et EC et égales entre elles comme tangentes issues de la bissectrice d'un même angle au centre. Nous aurons les points A' et C' à relier par une circonférence de rayon R et dont le centre est en O', intersection de la perpendiculaire A'O élevée sur A'B' en A' et de la bissectrice E'O'.

La réalisation pratique de ces tracés est particulièrement difficile dans le cas qui nous occupe, parce qu'il faut disposer les éclissages des rails de façon que les axes des trous de visite ou des puisards soient dans le prolongement l'un de l'autre, suivant FO par exemple.

Dans ce but, on commence par calculer les différentes longueurs de rails en courbe pour satisfaire à la condition de la superposition des axes, et voici comment on peut s'y prendre : je suppose qu'on ait déterminé la répartition des rails en voie droite jusqu'aux points G, G', g et g'. A partir de G, on porte une longueur de rail normal GH, égale à 10 mètres dans le cas actuel ; par des mesures prises sur le terrain, on connait exactement le point de naissance J de la courbe, on peut donc en déduire la longueur L du rail en courbe et ensuite, la grandeur l en observant que

$$\frac{L}{l} = \frac{R_e}{R_i} = \frac{\text{rayon extérieur}}{\text{rayon intérieur}}.$$

Il s'agit alors de connaître les dimensions gh et $g'h'$. Pour y arriver, on peut faire usage d'une formule où j'ai exprimé X en fonction des données du problème

$$\sin(\alpha - \beta) = \frac{a - b \operatorname{tg} \alpha}{R_e}$$

Digitized by Google

avec

$$X = \beta . R_e ; \qquad \alpha = \frac{L}{R_e}$$

$$a = \frac{\operatorname{tg} \varphi \times D}{R}$$

$$b = R_e + d - R_i .$$

En ajoutant X à jg, qui est connue, on aura la longueur gh.

D'autre part, $g'h' = g'j' + x$. Or $g'j' = gj$ et $x = X \frac{R_i}{R_e}$.

Les grandeurs GH, G'H', gh et $g'h'$ sont donc déterminées. On recherchera ensuite combien de rails de longueur normale on peut insérer dans la courbe JHIK, soit n le nombre entier, la fraction représente IK = L' qui permet, par l'application des formules précédentes, de calculer l', X' et x'.

MKI étant égale à une longueur normale, on en déduira les grandeurs M'I', mi et $m'i'$ qui rétablissent la concordance recherchée des axes en une droite suivant M m'. Les parties courbes H'I', hi et $h'i'$ seront à diviser en n parties, comme il a été fait pour HI.

Sur le terrain, on commencera par déterminer les axes BE, B'E', DE et D'E' ; l'application de la méthode des tangentes successives ou des ordonnées fournit divers points des axes des deux courbes. Les châssis seront placés à peu près dans leurs positions exactes, on placera les rails et par tâtonnements successifs on arrivera à un ajustage satisfaisant. Les calculs précédents servent simplement à indiquer les grandeurs des rails, ainsi que leur courbure ; si le coupage des rails à longueur voulue et le cintrage ont été bien exécutés, l'ajustage des courbes n'exigera pas énormément de travail ; dans le cas contraire, on aura du mal à arriver à un résultat passable,

Digitized by Google

toujours obtenu au prix de grands frais et de beaucoup de temps.

L'adoption de courbes concentriques en eut simplifié considérablement les calculs préliminaires et l'exécution pratique, sans devoir donner lieu à plus de désavantages.

L'excentricité des courbes se justifie dans le cas de traction animale, deux voitures venant de sens inverses pouvant se croiser sans se heurter aux marche-pieds ou autres parties saillantes ; mais, comme il est prudent de ne jamais permettre le croisement en courbe de deux trains mûs mécaniquement en raison des effets désastreux provoqués par un déraillement éventuel d'un d'eux, la disposition excentrique n'a pas de raison d'être. En dehors des difficultés de montage auxquelles j'ai fait allusion plus haut, il faut encore tenir compte de la variation de divers éléments, tels que couvercles des trous de visite et des puisards, leurs encadrements, entretoises, distances entre les trous de boulons pour l'entretoisage, etc. etc , toutes choses qui amènent beaucoup de retard dans l'achèvement de l'ensemble. La largeur de la rainure en courbe est de 33 mm Pour consolider la voie courbe, on a réuni les deux fondations un une seule, les deux rangées de châssis reposent donc sur le même monolithe, ce qui favorise la solidité de la construction. De plus, on a maçonné le caniveau au lieu de le bétonner pour pouvoir lui donner la courbure voulue.

J'arrive maintenant aux appareils spéciaux, dans lesquels le béton des caniveaux est également remplacé par la maçonnerie, comprenant, en premier lieu, les aiguillages pour changement de voie. On en distingue deux espèces se rapportant aux embranchements à traction animale et mécanique ; parmi cette dernière, on peut citer les aiguillages à caniveau et sans caniveau. La première, réunissant une ou deux conduites souterraines en une

Digitized by Google

dérivation de voie, est de beaucoup la plus intéressante. L'aiguille et son talon, renforcé par une pièce trapézoïdale à l'arrière, reposent sur des châssis spéciaux : ils figurent, en quelque sorte, un changement de voie suspendu. Les aiguilles mesurent 2^m135 ou 1^m92 selon le cas, la plus courte se plaçant au-dessus du caniveau le moins utilisé. Les liaisons possèdent des pièces de cœur de grandes dimensions, atteignant 2^m28 au croisement de deux caniveaux ; à la traversée des deux rails, genre Broca, elles ont une longueur de 1^m33.

Un entretoisage multiple consolide les divers parties d'une liaison, tandis que le nombre des isolateurs est augmenté. On conçoit que les conducteurs principaux soient interrompus aux aiguillages à cause de la rencontre de polarités inverses : les voitures les passent par la force vive acquise.

Le rayon de courbure à ces endroits atteint 26 à 27 m, sans aller en-dessous pour éviter le coïncement des roues ni dépasser cette mesure, pour ne pas devoir rendre les aiguilles trop longues et trop fines.

L'épaisseur à la pointe est de 25 mm environ dans le cas actuel, ce qui nécessite un élargissement double de son logement, qui atteint une largeur approximative de 70 mm.

Le passage des véhicules à faible bandage est donc dangereux en ces points ; les roues de voitures de tramway possèdent une largeur de bandage de 75 mm, qui paraît encore insuffisante, à en juger par l'usure irrégulière des pièces de cœur. L'angle au centre des aiguillages est constant : il a 13° 27′, ce qui donne aux liaisons un développement total de 16^m81.

Les traversées des voies sont de deux natures, suivant qu'on a deux caniveaux en croisant, ou non, deux autres ; on les constitue soit au moyen de châssis doubles, soit

Digitized by Google

au moyen de châssis simples avec consolidation d'équerres spéciales.

Voici la marche du montage :

Excavation et formation d'une tranchée de ± 2m50 d'ouvertures pour l'établissement de la fondation ; la profondeur variable avec le bombement du pavage peut être prise égale à 0m90 environ.

Bétonnage de la fondation par coffrage.

Placement des deux rangées de châssis à des distances de 1m25 d'axe en axe.

Pose des rails Haarmann sur les châssis et replacement de ceux-ci, de manière que les trous de boulons pour l'attache à l'équerre se correspondent

Attache provisoire des rails Haarmann aux châssis au moyen des équerres ; placement provisoire de connexions électriques.

Entretoisage et réglage de l'entre-voie.

Fixation définitive des rails Haarmann aux châssis.

Dressement de la voie et calage des châssis au moyen de coins en bois pour donner à tous les points des rails le niveau voulu ; on remplit les vides entre la fondation et les châssis avec du ciment

Réglage de la rainure à 30 mm en voie droite et 33 mm en voie courbe.

Bétonnage du caniveau et construction des trous de visite et des puisards.

Jointement du béton du caniveau aux châssis au moyen de ciment et lissage intérieur à la truelle.

Placement des isolateurs.

Pose des rails de contact.

Vérification et réglage définitif des parties.

Il est préférable, me semble-t-il, de faire précéder l'entretoisage des rails Haarmann par la suspension des rails de contact dans les ouvertures des châssis, quitte à

Digitized by Google

les placer définitivement après le montage des isolateurs. Cette manière de procéder dispense de l'introduction difficile des rails de contact dans le caniveau achevé, au risque d'endommager celui-ci.

Après achèvement de la voie à conduite, on opère la pose du rail, genre Broca, puis on fixe les entretoises principales d'une même voie.

L'usine de la rue Brogniez a été agrandie pour permettre la production d'énergie nécessaire à toutes les lignes à traction électrique. Les anciennes machines Mac-Intoxh et Seymor, à grande vitesse, ont été remplacées par quatre moteurs à marche lente, munis du système Bonjour, dont deux de la force normale de 750 à 1 400 chevaux indiqués, et deux plus petites produisant de 400 à 650 chevaux indiqués.

Une batterie de cinq chaudières, système Babcock et Wilcox, de 240 mq de surface de chauffe chacune, fournissent la quantité de vapeur nécessaire.

L'énergie électrique est produite par deux dynamos génératrices de 400 kw à huit pôles tournant à raison de 100 tours par minute et par deux dynamos de 225 kw à 6 pôles tournant à une vitesse de 120 tours par minute.

On a fait usage du couplage direct ; ce dispositif rationnel a donné, en Amérique, de remarquables résultats, comme le montre le tableau suivant, qui indique l'influence du choix de la transmission sur les frais d'entretien et d'exploitation :

Digitized by Google

Mode de production de l'énergie électrique.	Prix par voiture-kilomètre.
Machine Corliss, directement couplée d'une puissance supérieure à 1000 chevaux indiqués	fr. 0,137 à 0,19
Machine à grande vitesse, à condensation, compoundé avec transmission, puissance supérieure à 600 chevaux indiqués	fr. 0,206 à 0,293
Machine à grande vitesse, sans condensation, compoundé en tandem avec transmission, puissance supérieure à 400 chevaux indiqués.	fr. 0,208 à 0,296

Les génératrices doivent subir à la réception un courant alternatif de 5 000 V appliqué pendant une demi-heure sans accuser de défaut d'isolement. Elles ne doivent pas produire d'étincelles entre les limites de charge de 0 à 50 % de surcharge. Cette dernière, maintenue pendant 10 minutes, ne devra pas donner un échauffement anormal.

On a exigé un rendement de 0,75 entre la puissance disponible et celle indiquée.

Il n'y a rien de saillant à noter pour le matériel roulant, en dehors de la prise de courant qui est schématiquement représentée par la fig. 33. Chaque voiture est munie de deux appareils de contact doubles, un de chaque côté, portant chacun deux palettes glissant sur les rails de la conduite, suivant une surface interchangeable en cas d'usure. Un seul de ces appareils doubles est utilisé à l'aller, l'autre ne sert qu'au retour. La mise en place des palettes se fait en laissant descendre la prise de con-

Digitized by Google

tact par la rainure ; les palettes se redressent pendant ce passage pour se rabattre ensuite sur les conducteurs du caniveau au moyen de ressorts. On voit par le schéma que l'appareil de contact est muni d'une roulette, la destination de cette ajoute est de prévenir le bris de la prise de courant aux extrémités de la conduite. En ces points, un plan incliné permet à la roulette de monter du fond du caniveau au niveau de la rue ; en cas d'inadvertance du conducteur, la prise de contact continue à rouler sur le

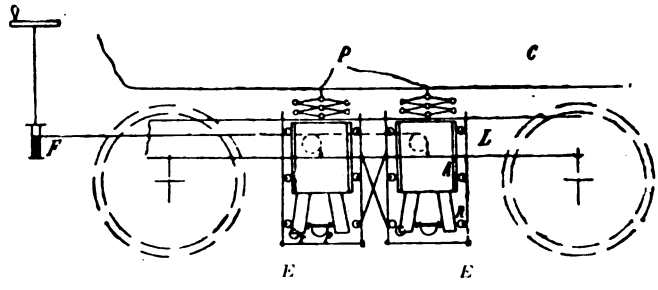


Fig. 3[illegible].

A — Armature en acier ;
C — Caisse de la voiture ;
E — Encadrement.
F — Fil de suspension de la prise de courant ;
L — Longeron ;
P — Prises de courant sur la voiture ;
p — palettes de prise de courant avec ressorts ;
R — Roulette-guide ;
r — roulette de sûreté ;

sol sans s'endommager. Cet arrangement est très ingénieux et mérite une attention spéciale. Les court-circuits de l'appareil de contact sont évités par une armature en tôle d'acier recouvrant l'isolant qui protège les conducteurs amenant le courant des palettes aux moteurs. Ceux-ci sont du type Waterproof de la General Electric C° et

Digitized by Google

ont une puissance de 25 chevaux : la réduction de 1 : 12 environ est simple et s'opère par roues dentées, tournant dans un bain d'huile. Chaque voiture porte deux moteurs suspendus de la façon indiquée schématiquement par la fig. 34.

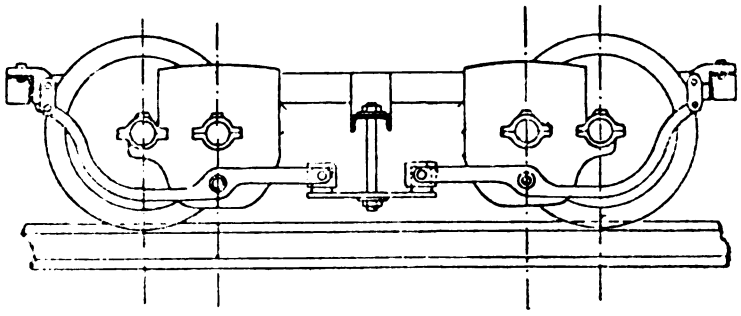


Fig. 34. — Suspension des moteurs.

Le réglage de la vitesse s'obtient par les combinaisons « séries parallèles » bien connues à sept degrés : trois pour la disposition en tension (champ fort) et quatre pour l'arrangement en dérivation (champ faible).

Le réglage est tel, que la voiture puisse atteindre, au bout de 25 mètres, la vitesse de 15 km à l'heure.

Les voitures sont munies de divers accessoires, tels que : parafoudres , coupe-circuit à souffleur , plombs fusibles, etc., dont je passe la description. Récemment, la Société des Tramways Bruxellois a fait des essais de freinage à l'air comprimé, système Westinghouse , qui permet d'atteindre des économies dans les frais d'exploitation, tout en assurant un service plus sûr et plus rapide. A cet effet, l'usine centrale est reliée par une conduite à l'extrémité de ligne où la prise d'air comprimé se fait au fur et à mesure des besoins.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Jacques, Julien, avec Mlle Eugénie Brouhon ; celui de notre camarade M. Pirard, Albert, avec Mlle Gabrielle Reculez ; et celui de notre camarade M. Philippe, Georges, avec Mlle Thérèse Cassart.

(Une erreur s'est glissée dans la Chronique du fascicule publié le 16 septembre dernier ; notre camarade M. Broad, Colin a épousé Mlle Fievet, Léonie et non Mlle Broad, Léonie.)

* * *

Le caractère international de notre Société lui fait un devoir de rechercher tous moyens propres à conserver intacts les liens d'amitié noués à l'Institut et à raviver le souvenir qui nous reste de tant de camarades aujourd'hui dispersés.

C'est pourquoi le Comité vient de décider de publier le portrait de chacun des sociétaires, au moment où il atteindra sa dixième année d'inscription à l'Association. Ces portraits, exécutés en photogravure, formeront une collection qui sera distribuée exclusivement aux membres de l'Association.

* * *

VIIe Congrès international de navigation. — Comme nos lecteurs l'auront sans doute appris, ce Congrès se réunira l'année prochaine à Bruxelles ; notre Association y sera représentée.

Digitized by Google

Conformément au vœu exprimé par le Congrès de La Haye, le VIIe Congrès s'occupera, pour la première fois, de questions relatives à la navigation maritime, en même temps que de celles qui ont trait à la navigation intérieure.

Nous relevons, au programme des travaux du Congrès, quelques questions qui intéressent particulièrement l'électricien.

1re section, 3e question. — Utilisation des chutes aux barrages comme force motrice. Moyens d'utiliser cette force en temps normal pour la traction des bateaux et pour les manœuvres à faire dans l'intérêt de la navigation. Utilisation de la vitesse des courants pendant les crues.

2e section, 1re question — Modes de traction mécanique le long des canaux. Améliorations réalisées ou proposées depuis le Congrès de La Haye.

2e section, 4e question. — Élévation mécanique, de bief en bief, des eaux servant à l'alimentation d'un canal Moyens de transmettre, directement ou à distance, la puissance nécessaire pour élever l'eau de bief en bief. Machine à vapeur, électricité, eau sous pression, etc.

3e section, 4e question — Dragages des rivières à marée et canaux maritimes. Dispositifs les plus récents de dragues à grande puissance, cas d'emploi, rendement, prix unitaire.

Nous faisons appel à ceux de nos camarades qui se sont occupés de l'un ou l'autre point de ces questions et qui voudraient bien se charger de faire un rapport exposant les idées qu'ils possèdent, pour contribuer à la collaboration que notre Société désire prendre aux travaux du Congrès. Le Secrétaire Général se tient à leur disposition pour tous renseignements qu'ils pourraient désirer.

Digitized by Google

* * *

Examens de sortie de l'Institut Montefiore.

Ont obtenu le diplôme d'ingénieur électricien.

1° Dans la section des élèves-ingénieurs :

Avec grande distinction : M. Fontaine, Félix, de Villers-le-Bouillet.

Avec distinction : MM. Bertholet, Armand, de Spa ; Feron, Albert, de Bruxelles ; Pirard, Léon, de Liége.

D'une manière satisfaisante : MM. Galmozzi, Italo, de Crémone ; Walch, Eugène, de Lyon ; Exelbirth, Grégoire, d'Odessa.

2° Dans la section des ingénieurs :

Avec la plus grande distinction : M. Kniphorst, Gerrit Jean, de Rotterdam.

Avec grande distinction : MM André, Henri, de Lyon; Van Rijn, Cornélis, de Swalle ; Van der Hecht, Léon, de Haegloert ; Caldarera, Evariste, de Palerme

Avec distinction : MM. Pirard, Albert, de Hasselt ; Theunis, Georges, de Montegnée ; Nicolini, Eugène, de Brescia ; Goldschmidt, Henri, de Paris ; de Luboradzky, Severin, de Varsovie ; Viscidi, Pasquale, de Calabritto ; Jovignot, Charles, d'Auroime ; Van Dooren, François, de Turnhout ; Valduga, Ugo, de Feltre ; Swieginski, Michel, de Varsovie ; Callet, Georges, de Naples ; Kroll, Léon, de Mohileff ; Peltzer, Alfred, de Verviers ; Segre, Ettore, de Modène ; Cassa, Gerrit Jacobus, de La Haye ; Maus, Benjamin, de Beauraing.

Digitized by Google

D'une manière satisfaisante : MM. Berlow, Michel, d'Odessa ; Doppler, Henri, de Maestricht ; Del Monte, Angelo, de Rome ; Nuzzaci, Bonaventura, de Soleto ; Weker, Ladislas, d'Odessa ; Van Asperen, Cornelis, de Batavia ; Hourko, Nicolas, de Smolensk ; Wilmet, Éli, de Cerfontaine ; Antoniotti, Richard, de Biella ; Tcherniak, Tcemach, de Khislavichi ; Limauge, Eugène, de Bruxelles ; Polain, Auguste, de Liége ; Van Musschenbroek, Pierre, de Java ; Gerard, Amédée, de Dison ; Andrews, Léopold, de Saint-Josse-ten-Noode ; Latmiral, Giuseppe, de Florence ; Martin, Joseph, d'Imply ; Della Giusta, Fausto, d'Udine ; Gelblum, Siméon, de Varsovie ; de Sauteiron de Saint-Clément, Charles, d'Ancône ; Duez, Jules, de Gand ; Foresti, Augusto, de Milan.

Ont obtenu le certificat de fréquentation avec fruit. Avec distinction : MM. Wagner, Georges, de Bourg ; De Bavelaere, Julien, de Ledringhen.

D'une manière satisfaisante : MM. Mohn, Christian, de Bergen ; Aguado, Cayetano, de Madrid ; Jullien, Georges, de Bogjweil ; de Echevarria, Raphaël, de Bilbao ; Herard, Théodore, de Dijon ; de Stampa, Alfred, de Paris.

Digitized by Google

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

Partie administrative.

	Pages.
Liste des membres de l'Association	3-73
Procès-verbal de la séance du 29 novembre 1896	27
Rapport annuel du Secrétaire Général	27
Situation financière de la Société	32
Procès-verbal de la séance du 20 décembre 1896.	75
Procès-verbal de la séance du 31 janvier 1897.	145
Élection d'un 7e Commissaire	146
Procès-verbal de la séance du 20 février 1897.	147
Procès-verbal de la séance du 28 mars 1897	195
Procès-verbal de la séance du 30 mai 1897.	245
Procès-verbal de la séance du 27 juin 1897. — Élection présidentielle	269
Modification aux bulletins d'élection	269
Procès-verbal de la séance du 1er août 1897	275
Admission de membres effectifs	299
Procès-verbal de la séance du 24 octobre 1897	331
Procès-verbal de la séance du 31 octobre 1897. — Élection du Comité	364

Communications techniques et scientifiques. Mémoires.

De Bast. — Éléments du calcul des générateurs électriques à courants alternatifs. (Discours inaugural du Président.) . 35-246

Van der Wallen et Mavroïdis. — Note sur l'emploi des courants biphasés dans l'industrie 75-300

Bayet. — Fabrication, par l'électrolyse, des alcalis et chlorates alcalins 153

Digitized by Google

Van Kesteren. — Construction des lignes de tramways à traction électrique 195-300-365
Del Proposto. — Télégraphie sans conducteur par le procédé Marconi 275
L'Hoest. — Le Block-système Westinghouse 292
Colard. — Les constantes de réaction et l'équation caractéristique d'un réseau électrique. — Méthode de l'état électrique variable 332

Comptes-rendus, traductions, extraits.

Diagrammes de charge d'une station centrale combinée de traction et d'éclairage 185
L'Œil électrique. 188
Les tramways électriques de Lugano. — Emploi des courants triphasés 189
Alternateurs Hutin-Leblanc-Farcot, installés à St-Ouen . 190
Lampes à arc destinées à l'éclairage de la rue 271

Divers

Exposition internationale de Bruxelles 1897. Section des sciences 63
Nécrologie. — Galilée Ferraris 147
Bibliographie. — Éclairage par l'Acétylène, G Pellissier. 329
VIIe Congrès international de navigation 392
Examen de sortie de l'Institut Montefiore 394

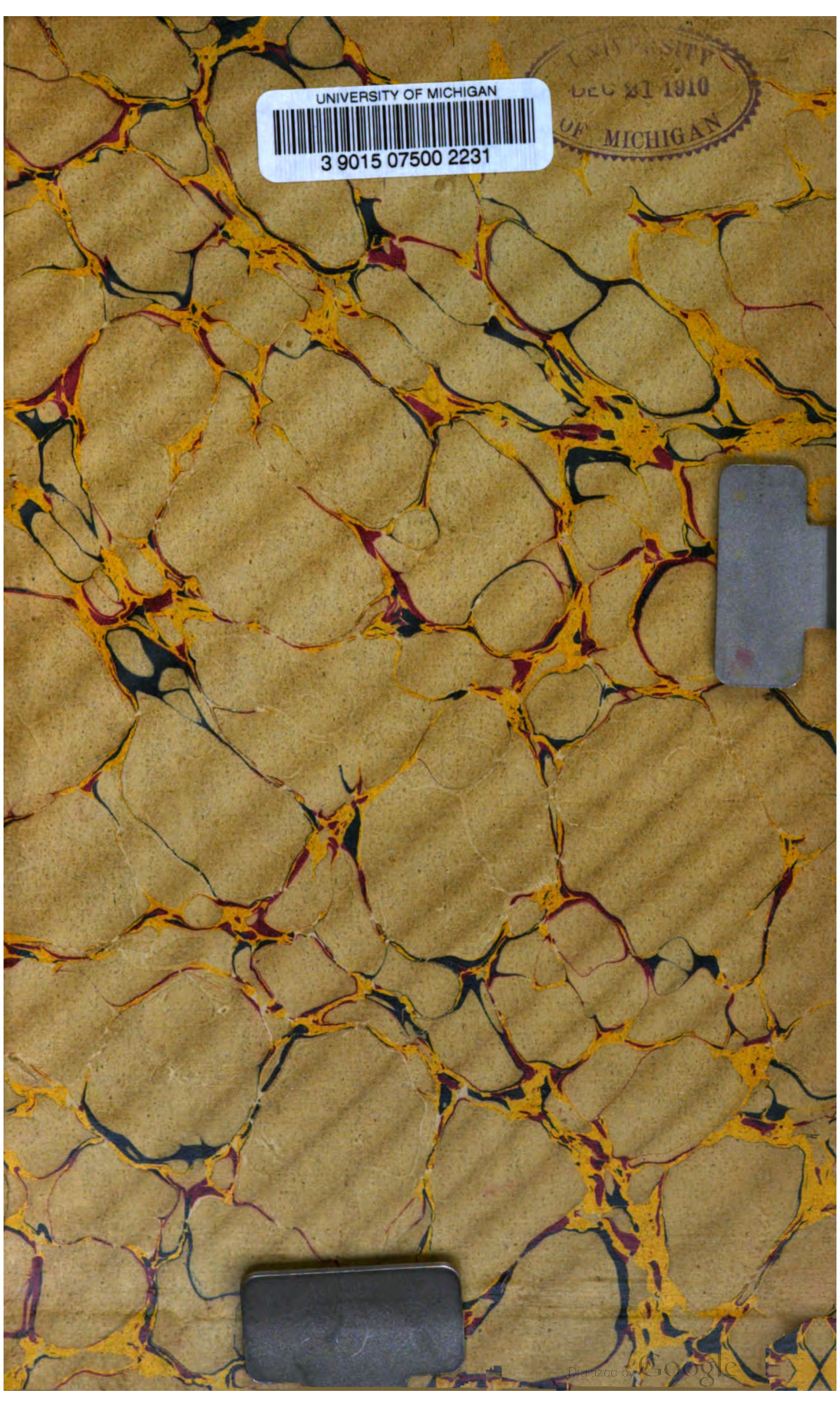
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google


Digitized by Google


UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 07500 2231
DEC 21 1910
OF MICHIGAN
Digitized by Google


Digitized by Google